

Braunschweigische  
Wissenschaftliche Gesellschaft

**Jahrbuch 1992**

---

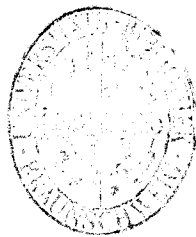
**VERLAG ERICH GOLTZE GMBH & CO. KG · GÖTTINGEN**  
**1993**

Das vorliegende Jahrbuch ist beim Verlag und beim Buchhandel erhältlich.  
Preis DM 20,-

Gedruckt mit Hilfe von Forschungsmitteln  
des Landes Niedersachsen

BWG 3300 Braunschweig  
Fallersleber-Torwall 16, Postfach 3329, Telefon (05 31) 3 91 – 45 96

Für die Redaktion verantwortlich:  
Der Generalsekretär der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft



ISSN 0931-1734  
ISBN 3-88452-238-8

Alle Rechte vorbehalten von  
Verlag Erich Goltze GmbH & Co. KG, 3400 Göttingen  
1993

Gesamtherstellung: Goltze-Druck, 3400 Göttingen

Printed in the Federal Republic of Germany

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Zur Geschichte der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (BWG) . . . . .	9

## PLENARVERSAMMLUNGEN

30.01.1992	in Braunschweig <i>V. H. Elbern:</i> Sakrale Kunst aus dem Umkreis der Theophanu. Zum 1000. Todestage der Byzantinerin auf dem deutschen Kaiserthron . . . . .	11
21.02.1992	in Braunschweig <i>C. A. Scheier:</i> Die Musik, die Zeit und die Philosophie . . . . .	17
20.03.1992	in Braunschweig <i>G. Oberbeck:</i> Der Großraum Hamburg – Genese sowie aktuelle Probleme der Planung und ihrer Realisierung . . . . .	25
24.04.1992	in Braunschweig <i>J. Herrenberger:</i> Die Baustelle „Alte Waage“ in Braunschweig . .	29
15.05.1992	in Hannover <i>E. Winterfeldt:</i> Sind Naturstoffe bessere Wirkstoffe? . . . . .	37
11.07.1992	in Clausthal <i>K. Leschonski:</i> Möglichkeiten zur Klassierung von Partikeln im Größenbereich um und unter 1 µm . . . . .	43
09.10.1992	in Braunschweig <i>G. Maurach:</i> Zur Schlacht vom Teutoburger Wald . . . . .	59
13.11.1992	in Braunschweig <i>H. Bürger:</i> Kurzlebigen Molekülen auf der Spur . . . . .	71
11.12.1992	in Braunschweig Bericht des Präsidenten und des Generalsekretärs über das Jahr 1992. Neuwahlen (vgl. Seite 145)	

## KLASSENSITZUNGEN

**Klasse für Naturwissenschaften und Mathematik**

21.02.1992	in Braunschweig <i>W. Stahl:</i> Isotopengeochemische Untersuchungen zur Genese und Migration von Kohlenwasserstoffen von Gesteinen der Hilf-Mulde (Ausführliche Darstellung in <b>Abhandlungen XLIII</b> [1992])	
------------	--	--

- 15.05.1992 in Hannover  
*F.R. Keßler: Photoleitung und Excitonen . . . . . 77*
- 09.10.1992 in Braunschweig  
*J. Hövermann: Neue Befunde zur Paläoklimatologie Nordafrikas  
 und Zentralasiens  
 (Ausführliche Darstellung in **Abhandlungen XLIII** [1992])*
- 13.11.1992 in Braunschweig  
*H. D. Ehrich: Entwurf verlässlicher Informationssysteme . . . . . 103*

### **Klasse für Ingenieurwissenschaften**

- 17.01.1992 in Braunschweig  
*O. Mahrenholtz: Eis als Baustoff in Permafrostregionen . . . . . 105*
- 28.02.1992 in Braunschweig  
*F. Haeßner: Forschungsarbeiten des Instituts für Werkstoffe der  
 Technischen Universität Braunschweig . . . . . 109*

### **Klasse für Bauwissenschaften**

- 24.04.1992 in Braunschweig  
*Regularien*
- 09.10.1992 in Braunschweig  
*Regularien*

### **Klasse für Geisteswissenschaften**

- 14.03.1992 in Braunschweig  
*H. Henne: Literaten als Chronisten der Sprache. Am Beispiel von  
 Arno Schmidt und Botho Strauß . . . . . 113*
- 23.05.1992 in Braunschweig  
*K. H. Körner: 500 Jahre Romania Nova: Linguistisches zu den  
 Anfängen  
 (Kein schriftlicher Überblick infolge plötzlichen Ablebens des Vortragenden)*
- 10.10.1992 in Braunschweig  
*G. Maurach: Bacchus – von Homer bis heute  
 (Ausführliche Darstellung in **Abhandlungen XLIV**)*
- 09.11.1992 in Braunschweig  
*Regularien*



## KOMMISSIONEN

Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunstgeschichte . . . . .	115
Kommission für Umwelt und Technik . . . . .	116
Kommission für Recht und Technik . . . . .	116

## FEIERLICHE JAHRESVERSAMMLUNG 19. JUNI 1992

**Öffentliche wissenschaftliche Vorträge**

<i>V. Krebs</i> und <i>A. Rehkopf</i> , Karlsruhe: Modellierung, Stimulation und Steuerung flexibler Fertigungssysteme . . . . .	119
<i>A. Munack</i> , Braunschweig: Automatisierungstechnik im Dienste der umwelt-schonenden Landwirtschaft . . . . .	131
<i>W. Leonhard</i> , Braunschweig: Zum Stand der autonomen optischen Fahrzeug-führung, ein Blick ins PROMETHEUS-Forschungsprogramm . . . . .	135

**Festversammlung im Altstadttrathaus**

Ansprache und Bericht des Präsidenten der BWG, Prof. Dr. <i>Gerhard Oberbeck</i> . . . . .	145
Laudatio zur Verleihung der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille an Prof. Dr. <i>E. D. Gilles</i> durch Prof. Dr. Dr. h.c. Dr. h.c. <i>Manfred Thoma</i> . . . . .	153
<i>E. D. Gilles</i> : Modellgestützte Regelung – ein Beitrag zur Autonomie von Pro-zessen und Systemen . . . . .	157
Urkunde und Lebenslauf des Preisträgers . . . . .	168
Schlußwort durch Vizepräsident Prof. Dr. <i>J. Herrenberger</i> . . . . .	171

## MITTEILUNGEN

Veröffentlichungen . . . . .	173
Geschäftliche Mitteilungen . . . . .	173
Satzung und Geschäftsordnung der BWG . . . . .	173

## PERSONALIA

Todesfälle . . . . .	174
Nachrufe	
<i>Hans-Kurt Tönshoff</i> : Friedrich Erdmann-Jesnitzer (1910–1990) . . . . .	175
<i>Karl-Heinrich Olsen</i> : Martin Gosebruch (1919–1992) . . . . .	177
Zuwahlen . . . . .	181
Inhaber der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille . . . . .	184
Mitgliederverzeichnis . . . . .	187



## **Zur Geschichte der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft**

Im Jahre 1943 führten die Initiativen einiger Professoren der Braunschweiger Technischen Hochschule Carolo Wilhelmina zur Errichtung der „Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft“. Sie wurde nach Genehmigung der vorgelegten Satzung durch den damals zuständigen Reichsminister für Wissenschaft, Erziehung und Volksbildung am 9. Dezember 1943 in einer feierlichen Sitzung konstituiert. Das zu diesem Anlaß von dem ersten Vorsitzenden des Senats der neuen Gesellschaft, Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmidt, erstattete Referat gibt Auskunft über die Motive dieser Gründung. Maßgebend war der Wunsch nach Überwindung eines allzu engen wissenschaftlichen Spezialistentums und einer einseitigen Orientierung der Forschung auf rasche Verwertbarkeit ihrer Ergebnisse. Dies wird in der ersten Sitzung der Gesellschaft deutlich. In deren § 1 bestimmt sie: „insbesondere soll sie über die fachlichen Grenzen hinaus die Bearbeitung von Gemeinschaftsaufgaben übernehmen und dazu beitragen, innere Beziehungen zwischen allen Wissens- und Lebensgebieten herzustellen“. Organisatorisch war die Neugründung als selbständige wissenschaftliche Gesellschaft mit eigenen Organen (Kuratorium, Senat, Fachbereiche) angelegt. Der jeweilige Rektor der Technischen Hochschule Braunschweig war jedoch ex officio zum Präsidenten der Gesellschaft bestimmt, was hauptsächlich auf eine administrative Vereinfachung abzielte.

Bis Ende 1944 wurde die Gesellschaft durch Berufung von Mitgliedern aus verschiedenen Fachgebieten personell ausgebaut. Besondere Aktivitäten konnte sie in den letzten Monaten des zweiten Weltkrieges nicht mehr entfalten. Sie bestand auch nach dem Kriege unter einem kommissarischen Präsidenten unverändert fort. Jedoch wurden Maßnahmen eingeleitet, um die Gesellschaft uneingeschränkt zu verselbständigen, wobei die Organisationsform einer Akademie der Wissenschaften angestrebt wurde. Sie war im Kern durch Selbstergänzung und begrenzte Platzzahl der Mitglieder sowie durch Gliederung in Fachbereiche bereits vorhanden.

Vor allem wurde die Gesellschaft nun auch mit ihrem Plenum und ihren Abteilungen – seit 1950 Klassen – wissenschaftlich aktiv. In beiden Bereichen wurden wissenschaftliche Vorträge und Diskussionen durchgeführt. Initiiert von Prof. Dr. phil. Eduard Justi erschien 1949 der erste Band der als Publikationsorgan eingerichteten „Abhandlungen“. Im gleichen Jahre verlieh die Gesellschaft erstmalig die kurz zuvor gestiftete Carl-Friedrich-Gauß-Medaille. 1953 erhielt die Gesellschaft schließlich den Status einer Körperschaft des öffentlichen Rechts. Mit dem Errichtungserlaß des Niedersächsischen Landesministeriums wurde ihr zugleich eine neue Satzung gegeben, in der freilich Teile der ehemaligen Satzung erhalten geblieben waren. Erst 1971 erhielt die Gesellschaft ihre heute gültige Satzung, die sie im Geiste einer Akademie der Wis-

senschaften mit deutlich technischem Schwerpunkt auszufüllen bestrebt ist. In diesem Rahmen finden laufend wissenschaftliche Plenar- und Klassensitzungen statt. Zur Durchführung langfristiger Forschungsvorhaben hat die BWG eine Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunstgeschichte, eine Kommission für Umwelt und Technik und eine Kommission für Recht und Technik eingesetzt. Von den jährlich erscheinenden „Abhandlungen“ sind bisher 43 Bände und in der Schriftenreihe der Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunstgeschichte 5 Bände publiziert worden. Initiiert von Prof. Dr. techn. Karl Heinrich Olsen veröffentlicht die BWG seit 1983 Jahrbücher, die insbesondere über Vortragsveranstaltungen, Kommissionstätigkeiten und Personalien berichten.

VICTOR H. ELBERN, Berlin

**Sakrale Kunst aus dem Umkreis der Theophanu**

Braunschweig, 31. Januar 1992\*

Die 1000-jährige Wiederkehr des Todestages der byzantinischen Prinzessin Theophanu, Gemahlin Kaiser Otto II., hat im Jahre 1991 eine Reihe von wissenschaftlichen Veranstaltungen nach sich gezogen, so in Köln als dem Ort ihres Begräbnisses, in Bad Gandersheim, wo eine ihrer Töchter als Äbtissin des Stiftes amtierte, in Freiburg i.Br. und schließlich in Thessaloniki, wo – in Verbindung mit dem Goethe-Institut – die Universität der Stadt und das griechische Volk der großen Landsmännin gedachten. Im Rahmen solcher Veranstaltungen war auch der hier zusammengefaßte Vortrag vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gedacht, sinnvoll besonders im Blick auf die engen Verbindungen des ottonischen Kaiserhauses mit Niedersachsen und dem Harzgebiet.

Aus der Fülle möglicher Fragestellungen wandte sich das Referat den glanzvollen künstlerischen Schöpfungen ottonischer Zeit in edlen Materialien zu, an denen – wie man seit langem zu erkennen glaubt – die Byzantinerin auf dem deutschen Kaiserthron einen bedeutenden Anteil gehabt hat. Mit besonderer Intensität ist in der Forschung dabei die Frage nach Mitgift und Hinterlassenschaft der Herrscherin gestellt worden, die ihrem Gatten nach dessen frühem Tode 983 als Vormund des Sohnes Otto III. und als Regentin folgte. Als weitere Eingrenzung des Themas war beabsichtigt, unter den in Frage stehenden Zimelien Werke der liturgischen Kunst in besonderer Weise zu würdigen.

Einige historische Hinweise können dazu beitragen, die Fragestellung zu konkretisieren. Thietmar von Merseburg berichtet, wie die Prinzessin Theophanu aus Konstantinopel „magnificis muneribus comitatuque egregio“ in Italien landete, um in Rom dem Sohne Ottos des Großen angetraut und an seiner Seite gekrönt zu werden. Nach Ottos III. Tode 1002 brachte, wie weiter berichtet wird, der Baiernherzog Heinrich außer den Insignien der Königswürde auch die persönlichen „ornamenta“ des Toten in seinen Besitz. Die große Zahl an Weihgaben byzantinischer Provenienz, mit denen Heinrich II. als Kaiser die verschiedensten kirchlichen Einrichtungen und Gründungen begabte, haben die Forschung darauf schließen lassen, daß die genannten „ornamenta“ zum großen Teil der Hinterlassenschaft der griechischen Mutter Ottos III. entstammten. Es lag ferner nahe, auf solcher Grundlage eine Rekonstruktion der Mitgift bzw. des Brautschatzes und zumal des Kunstbesitzes der Herrscherin zu versuchen. Man wird annehmen dürfen, daß sich darunter zunächst kostbare Stücke der persönlichen Ausstattung einer vornehmen Dame befanden wie profaner Schmuck, Zierate, Toilettengegen-

---

\* Zusammenfassung eines vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehaltenen Vortrags. Der vollständige Vortragstext wird veröffentlicht im Sammelband des Kölner Colloquiums „Kunst im Zeitalter der Kaiserin Theophanu“ (im Druck).

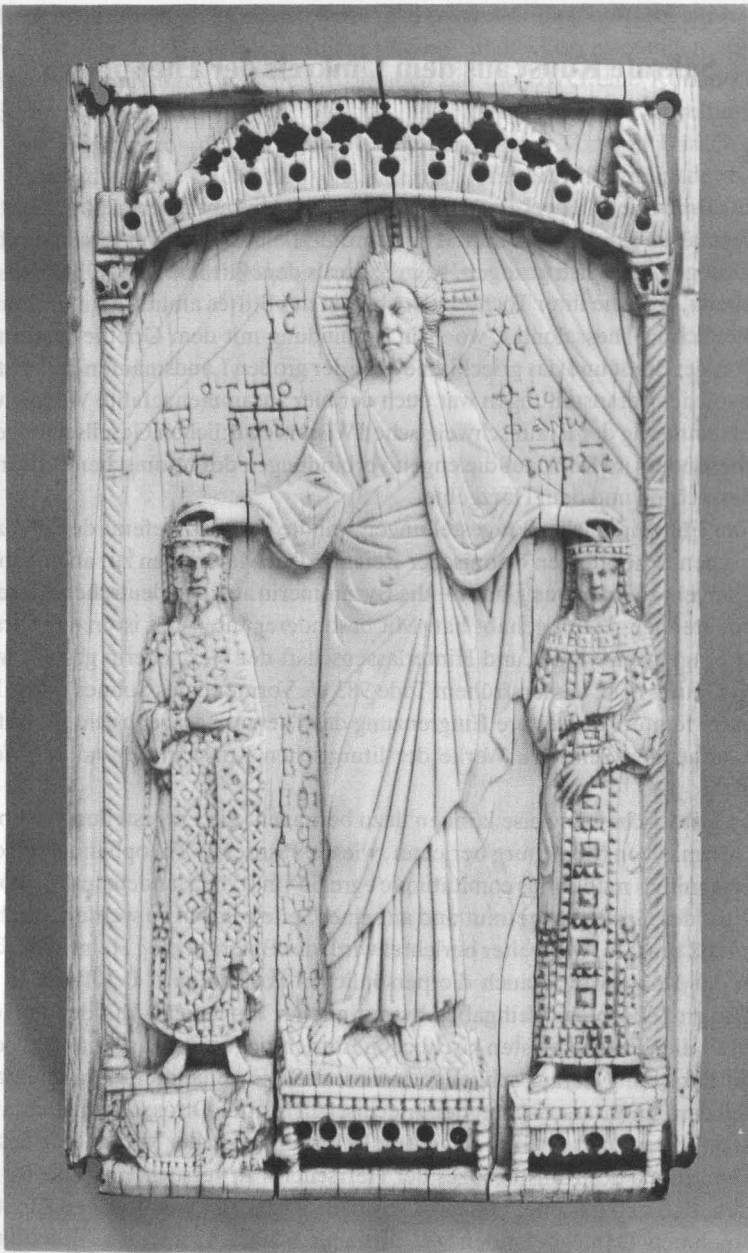


Abb. 1:  
Krönungselfenbein Ottos II. und der Theophanu  
Paris, Musée Cluny



*Abb. 2:  
Die Kaiserinnen Adelheid und Theophanu  
Mailand, S. Ambrogio, Altarziborium*

stände, Tafelgeschirr und kostbare Textilien. Sicherlich besaß die Prinzessin und spätere Kaiserin auch zahlreiche liturgische Objekte, Bücher und Ikonen. Weiß man doch schon aus karolingischen Quellen, daß entsprechende Kostbarkeiten auch zum privaten Besitz fürstlicher Personen gehörten.

Für die hier angestellten kunsthistorischen Überlegungen ist es weiterhin wichtig, den Personenkreis in der Umgebung der Kaiserin ins Auge zu fassen. Aus ihrer unmittelbaren Umgebung ist der Grieche Johannes Philagathos zu nennen, später zum Erzbischof von Piacenza erhoben, ferner der Hofkaplan, spätere Erzbischof von Mainz und Erzkanzler des Reiches Willigis, schließlich der Erzieher des Kaisersohnes und spätere Bischof von Hildesheim, der kunstliebende Bernward. Neben den hohen Kirchenmännern und ihrem Umkreis wird man auch im Besitz und unter den späteren Stiftungen der Kinder, Enkel, Neffen und Nichten der Herrscherin nachforschen können, – in Quedlinburg und Gandersheim, in Köln und in Essen. Von da aus ergeben sich deutlich erkennbar geographische Schwerpunkte im Rhein-Maas-Land und in Niedersachsen, aber auch beispielsweise in Oberitalien. In all diesen Bereichen bieten sich Nachforschungen an.

Unter den für unsere Darstellung interessierenden kostbaren Objekten in liturgischer Verwendung gibt es nur sehr wenige, die sich unmittelbar mit der Kaiserin Theo-

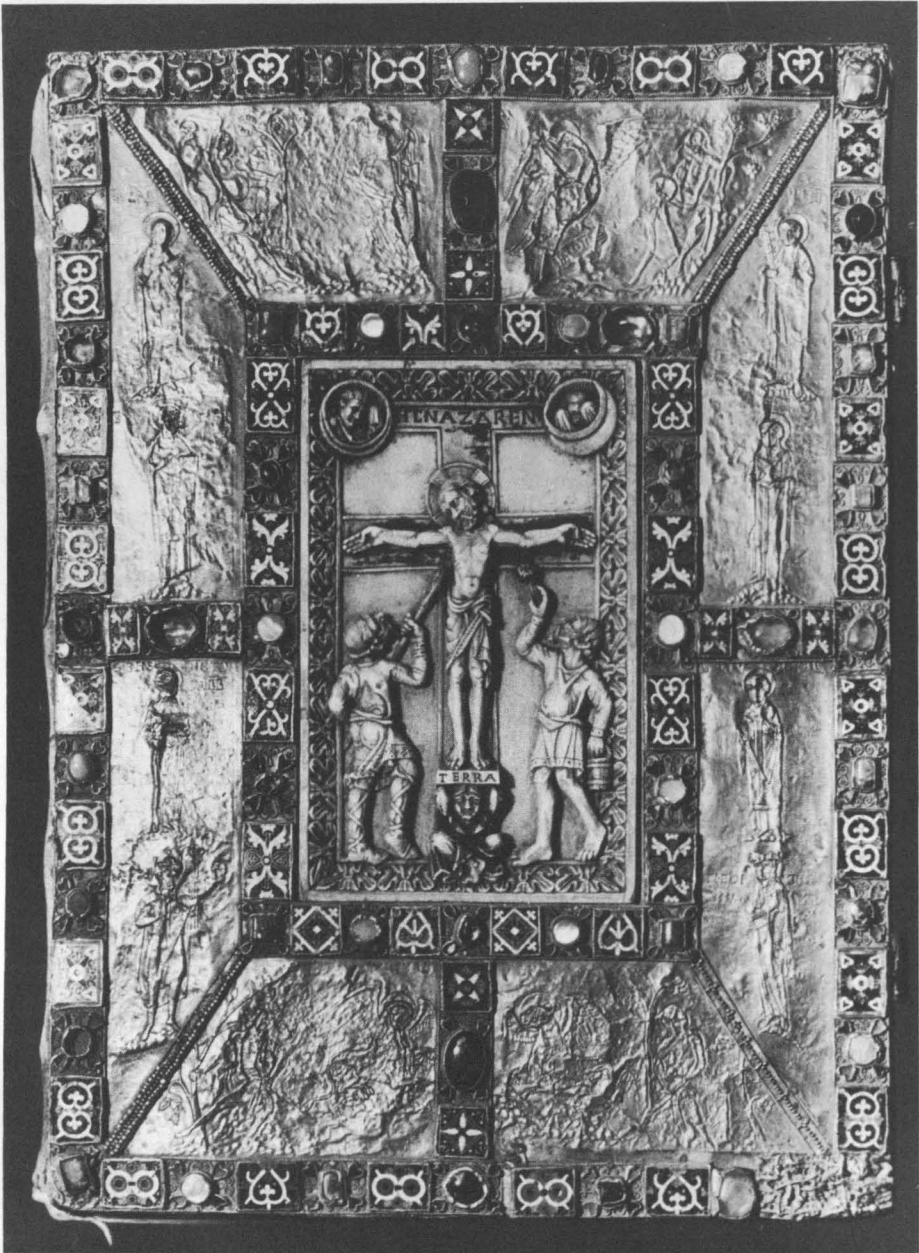


Abb. 3:

Deckel des Codex Aureus von Echternach  
Nürnberg, Germanisches National-Museum



phanu in Verbindung bringen lassen. Faßt man den Begriff so weit, daß auch die Vorgänge und Darstellungen quasi-liturgischer herrscherlicher Repräsentation einbezogen werden, dann läßt sich mit dem sog. Krönungselfenbein in Paris die unmittelbare Präsenz der Theophanu dokumentieren, vielleicht entsprechend auch mit der sog. Trivulzio-Tafel in Mailand, wenn man nämlich die Darstellung dieses Reliefs auf Otto II. bezieht. Die Verbindung mit Mailand, die sich in der letzteren Zimelie andeutet, wird nicht nur mit zwei für die Ottonenkaiser in dieser Stadt angefertigten Elfenbeinsitulen bekräftigt, sondern vor allem auch mit einer Wiedergabe von zwei fürstlichen Frauen auf dem Altarziborium von S. Ambrogio ebendort, in denen man begründeterweise die Kaiserin Adelheid und ihre – im Unterschied zu ihr – gekrönte Schwiegertochter Theophanu erkennen darf.

Die kostbarste und bedeutsamste liturgische Zimelie aus dem Umkreis der Theophanu ist der historisch aufschlußreiche Deckel des Codex Aureus Epternacensis in Nürnberg, auf dem sie auch selber, zusammen mit ihrem Sohn Otto III. und heiligen Patronen und Missionaren wiedergegeben ist. Die in diesem Werk bezeugte Verbindung der Kaiserin zu dem großen künstlerischen Zentrum Trier mag wichtige Aufschlüsse auf ihr weitgespanntes Mäzenatentum erlauben.

Der Vortrag versuchte des weiteren, mit einer gewissen Systematik liturgischen Objekten aus dem Umkreis der Theophanu nachzuspüren. Für das Diskopoterion – Kelch und Patene – als wesentliche liturgische Objekte gibt es praktisch keinen sicheren Anhaltspunkt. Mehrere byzantinische Kelche aus ihrer Lebenszeit, vorwiegend mit Kuppel aus Halbedelstein, finden sich zwar in S. Marco in Venedig, aber direkte Beziehungen lassen sich nicht herstellen. Immerhin erfahren wir z. B. aus Hildesheim, daß es entsprechende Kelche aus der Zeit des Bischofs Bernward dort gegeben hat. Ob von hier aus eine Linie zum Kunstbesitz der Theophanu gezogen oder eine Anregung aus Byzanz erschlossen werden darf?

Es bleibt allgemein schwierig, bestimmte liturgische Zimelien ottonischer Zeit mit der byzantinischen Kaiserin zu verbinden. So bleibt beispielsweise die Frage offen, ob das sog. Anastasiusreliquiar im Aachener Domschatz der Theophanu zu verdanken ist, wie dies seinerseits von Hans Wentzel vermutet wurde, als er seine Überlegungen zum Brautschatz der Theophanu anstellte. Nun ist schon lange bemerkt worden, daß seit dem späteren 10. Jahrhundert eine beachtliche Zahl antiker Steinschnitte an liturgischen Objekten begegnet. An erster Stelle ist hier das sog. Lotharkreuz in Aachen zu erwähnen, mit dem herrlichen Augustuskameo im Zentrum, bei dem unsicher bleibt, ob dieser Kameo als Bild Christi oder des christusähnlichen Kaisers zu verstehen ist. Für die Entstehungszeit dieses – vermutlich in Köln geschaffenen – Kreuzes wird aus historischen wie stilistischen Gründen von uns eher die Zeit um 980 vorgeschlagen als wie bisher meistens um 1000. Diese Umdatierung geschieht nicht zuletzt in Parallele zum Essener Otto-Mathilden-Kreuz, der Stiftung eines Neffen und einer Nichte der Kaiserin. Weitere Beispiele mögen sich mit dem Kölner Kreuz des Erzbischofs Herimann, ebenfalls eines Neffen der Theophanu, dem Kameo des Basler Heinrichskreuzes und mit anderen Kreuzzieraten aus der Hinterlassenschaft Kaiser Heinrichs II. nennen lassen.

In diesem Zusammenhang bleibt die Frage offen, ob im Besitz der Kaiserin nicht auch ein Reliquiar mit Partikel des Hl. Kreuzes vorausgesetzt werden darf, wie es für Bernward von Hildesheim sicher angenommen, für Köln vermutet werden kann. Das einzige charakteristische Kreuzreliquiar ottonischer Zeit, das sog. Heinrichsportatile aus Bamberg in München, ist jedenfalls so überzeugend dem Typus byzantinischer Staurotheken nachgestaltet, daß ein Zusammenhang unabweisbar erscheint. Es ist weiter selbstverständlich, daß Theophanu auch andere Reliquien und Reliquiare besessen bzw. mitgebracht haben muß. Mehrere kleinere byzantinische Reliquiare, die sich heute noch in Quedlinburg befinden, lassen sich überzeugend auf die Äbtissin Adelheid, eine Tochter der Theophanu zurückführen, so ein Demetriusphylakterion und ein sog. Kanakrug.

Griechische Bücher sind für Theophanu (bisher) nicht nachweisbar. Es ist jedoch aufschlußreich, daß uns nicht wenige byzantinische Elfenbeintafeln als Deckelzierate ottonischer Handschriften begegnen, – teils als Stiftungen Ottos II. und III., teils auch Heinrich II. zuzuweisen, – in Quedlinburg und Hildesheim, Bamberg und Aachen. Aus dem ursprünglichen Besitz der Kaiserin mögen auch die Spolien dorthin gelangt sein, die sich noch heute an dem Heinrich II. verdankten Ambo der Pfalzkapelle befinden. Dabei vermutete schon Hans Wentzel, dies sei vielleicht ein Akt der Wiedergutmachung gewesen für die oben erwähnte Wegnahme der „ornamenta“ Ottos III. durch den Baiernherzog und späteren Kaiser.

Schließlich sollten mancherlei Reflexe nicht unterbewertet werden, die sich am Ende des 10. bzw. zu Anfang des 11. Jahrhunderts in der Kunst finden lassen, – in byzantinisierenden Texten, Besonderheiten östlicher Ikonographie und Stileigentümlichkeiten. In diesem Zusammenhang ist besonders zu bedauern, daß aus der Hinterlassenschaft und dem weiteren Umkreis der byzantinischen Kaiserin keine gemalte Ikone nachgewiesen werden kann, – es sei denn, man wollte hier an die berühmte kleine Mosaikikone des hl. Nikolaus in Aachen-Burtscheid denken. Es ist problematisch, mögliche Einwirkungen, Reflexe oder Einflüsse zu individualisieren und damit auf die Person der Herrscherin zu beziehen. All dies mündet allzuoft in allgemeine byzantinisierende Tendenzen ein, die auch kaum sicher zu datieren sind. Unbezweifelbar allerdings ist ein stärkerer byzantinischer Einfluß in der Kunst des Ottonenreiches, am Rhein, in Niedersachsen und auch in Oberitalien. Somit ist es eine allgemeine geistige Einwirkung, die man aus der Hinterlassenschaft der byzantinischen Prinzessin auf dem deutschen Kaiserthron als ihre entscheidende Mitgift an die künstlerische Kultur des frühmittelalterlichen Reiches bewerten sollte.

CLAUS-ARTUR SCHEIER, Braunschweig

## Die Musik, die Zeit und die Philosophie

Braunschweig, 21. Februar 1992\*

Das Mozart-Jahr liegt hinter uns, ebenso die Verleihung des Spohr-Preises an Olivier Messiaen. Aber wir freuen uns schon aufs Bach-Fest, das dieses Jahr in Braunschweig stattfinden wird, und feiern (1792 entstand übrigens die *Marseillaise*) den zweihundertsten Geburtstag von Gioacchino Rossini. So ist auch 1992 äußerer Anlaß genug, viel Musik zu hören.

Wie schön! Nur mögen dem einen oder andern bei so viel Musik vielleicht doch die Verse aus Buschs *Dideldum!* in den Sinn kommen:

Musik wird oft nicht schön gefunden,  
Weil sie stets mit Geräusch verbunden.

Eine Verbindung, die Busch offenbar beschäftigt hat. Anderswo sagt er:

Besonders wird das Saitenspiel  
Dem Nebenmenschen oft zu zuviel.

Oder in *Fipps der Affe*:

Oft wird es einem sehr verdacht,  
Wenn er Geräusch nach Noten macht.

Über sein Verhältnis zur Tonkunst befand er jedenfalls:

Ein Maler und ein Musikus  
So Wand and Wand, das gibt Verdruß.

Den Verdruß hat, zunächst, versteht sich, der Maler, eben weil die Kunst seines Wandnachbarn „stets mit Geräusch verbunden“ ist. Was überhaupt die Geräusche angeht, schrieb der Dorfbewohner schauernd über das Schweineschlachten an den Malerfreund Lenbach: „Wahrlich! Gewisse Dinge sieht man am deutlichsten mit den Ohren.“ Merkwürdig dabei, daß das Wort ‚Geräusch‘ in der Metzgersprache die Innereien von Schlachttieren bedeutet. Dem liegt, versteht sich, eine andere Etymologie zugrunde; hingegen der von Busch wieder und wieder so kenntnisreich abgeschilderte Rausch schreibt sich wie das „Geräusch nach Noten“ vom Rauschen her.

Daß es nicht nur einen alkoholischen, sondern auch einen musikalischen Rausch gibt, haben die Menschen seit unvordenklichen Zeiten gewußt und genutzt. Als aber die alten Griechen anfangen, sich über die Musik, die sie allenthalben privat und öffentlich, in Krieg und Frieden machten, zu verwundern, da fragten sie unter anderem, woher es wohl käme, daß von allen Künsten einzig diese die Macht hat, den Menschen „außer sich“ zu bringen. Muß sie ihn dazu nicht tiefer als die andern Künste ergreifen? Und womit ergreift sie ihn und woran? So kam es, daß die Philosophie, lange bevor sie

---

\* Vortrag vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

an eine Theorie der schönen Künste dachte oder gar allgemein an eine Ästhetik, nämlich schon in jenem sechsten vorchristlichen Jahrhundert, in dem sie entstand, eine Theorie der Musik entwarf.

Und wenn Buschs Bildergeschichte *Die feindlichen Nachbarn* mit den Versen endet:

Verruiniert stehn beide da,  
Das tatest du, Frau Musika!

dann könnte man nicht einfach eine parallele Geschichte erfinden, in der statt der Frau Musika zur Abwechslung die Frau Piktura an allem schuld wäre. Der Maler will uns ja keineswegs bloß über etwas Menschliches, Allzumenschliches zum Lachen bringen. Mitten im deutschen Dorf- und Kleinstadtleben macht seine spitze Feder mit ihren einschlägigen Skizzen und Versen vielmehr die Probe aufs Exempel des dritten Buchs von Schopenhauers *Welt als Wille und Vorstellung*. In diese „Welt-Ansicht“ hatte Busch sich, wie er schrieb, „mit Leidenschaft und Ausdauer“ spätestens seit 1869 vertieft. Und der von Wilhelm Raabe ironisch als der „Mann von der schönen Aussicht in Frankfurt am Main“ titulierte Pessimist, der der Mit- und Nachwelt in seinen galligen Essays auch einmal *Ueber Lerm und Geräusch* die Leviten las, hatte gefunden, daß nichts heterogener sei, „als die stille, sanfte Wirkung des Lichts und die Allarmtrommel des Gehörs“. Hierfür konnte er sich auf seinen Gewährsmann Kant berufen, der anlässlich der *Vergleichung des ästhetischen Werts der schönen Künste untereinander* in der *Kritik der Urteilkraft* bemerkt hatte:

Außerdem hängt der Musik ein gewisser Mangel der Urbanität an, daß sie, vornehmlich nach Beschaffenheit ihrer Instrumente, ihren Einfluß weiter, als man ihn verlangt (auf die Nachbarschaft), ausbreitet, und so sich gleichsam aufdringt, mithin der Freiheit andrer, außer der musikalischen Gesellschaft, Abbruch tut.

Der Königsberger verband damit eine sehr persönliche Erfahrung, denn die Insassen des nahe seiner Wohnung gelegenen Stadtgefängnisses waren das ganze Jahr über, auch im Sommer bei geöffneten Fenstern, zu moralisch kräftigendem Chorgesang angehalten. Darum fügte er gleich noch eine Fußnote pro domo bei:

Diejenigen, welche zu den häuslichen Andachtsübungen auch das Singen geistlicher Lieder empfohlen haben, bedachten nicht, daß sie dem Publikum durch eine solche *lärmende* [...] Andacht eine große Beschwerde auflegen, indem sie die Nachbarschaft entweder mit zu singen oder ihr Gedankengeschäft niederzulegen nötigen.

So scheint Musik die Erzfeindin der Philosophie zu sein, weil unter allen Künsten sie allein den Philosophen zwingt, entweder sein Gedankengeschäft niederzulegen oder – mitzutun. Tief sinniges Entweder-Oder! Hatte die Philosophie sich etwa darum so zeitig mit der Musik eingelassen? Freilich war es derselbe Schopenhauer, der gerade wie der von ihm im übrigen abgründig gehaßte Hegel nicht müde wurde, das Lob des großen Rossini anzustimmen, und der in der *Welt als Wille und Vorstellung*, seinem „Hauptwerk“, sogar soweit gegangen war, zu behaupten, eine vollständige Erklärung der Musik wäre nicht weniger als „die wahre Philosophie“ selbst. Denn, meinte er, alle andern Künste „reden nur vom Schatten, sie aber vom Wesen“. Der Positivist Rudolf Carnap

konnte deswegen nicht ganz ohne historische Legitimation mit einem Seitenhieb auf Heidegger deketieren, „Metaphysiker“ seien „Musiker ohne musikalische Fähigkeit“.

Das „Wesen“, von dem die Musik also redet, ist die begriffene Welt, und wenn Philosophie, Schopenhauer zufolge, die „genügende Wiederholung und Erklärung der Welt in Begriffen“ ist, dann berührt seine Überzeugung von der Analogie zwischen Musik und Philosophie jene Lehre vom musikalischen Wesen des Kosmos, die damals im sechsten Jahrhundert von den Pythagoreern ausgearbeitet worden war und bis in die Neuzeit hinein in mancherlei Gestalt lebendig geblieben ist. Wir zum Beispiel kennen sie alle aus Goethes *Faust*:

Die Sonne tönt nach alter Weise  
In Brudersphären Wettgesang,  
Und ihre vorgeschriebne Reise  
Vollendet sie mit Donnergang.

Die Pythagoreer hatten nämlich im Variieren der Längen klingender Saiten die mathematischen Gesetze der Intervallverhältnisse entdeckt; die musikalische Harmonie, fanden sie, ist eine Proportion ganzer Zahlen, die Musik mithin klingende Mathematik. In diesem Sinne ist noch bei Leibniz nachzulesen, daß die Schönheit der Musik in nichts anderem bestehe als in der Übereinstimmung der Schwingungszahlen klingender Körper, die die Seele beim Hören unbewußt errechne. Diese rationale Harmonie übertrugen die Pythagoreer nun auf die Welt als auf die Verhältnisse der himmlischen Körper zueinander, deren „All“ so zuerst als *kosmos*, als „schönes Ganzes“ erschien. Und das Klingen der kosmischen Proportionen im gesetzmäßigen Umschwung der Gestirne, diese Harmonie der Sphären, vernahmen wir nur deshalb nicht, weil wir in sie hineingeboren würden und ihrer Beständigkeit wegen nicht von der Stille unterscheiden könnten. Das war alles andere als müßige Spekulation, denn auch die menschliche Seele wurde als eine solche Harmonie aufgefaßt und – als die Mitte zwischen Seele und Welt – die verfaßte Stadt, der Staat, die *polis*, um die es dem frühen griechischen Denken immer auch dort zu tun war, wo es sich scheinbar, wie in den Philosophiegeschichten nachzulesen, nur mit der „Natur“ befaßte. Griechisch gedacht ist die Musik daher immer zugleich ein seelisches, ein kosmisches und ein politisches Phänomen, weswegen Aristoteles sie auch im pädagogischen Teil seiner *Politik* abgehandelt hat und nicht etwa in der *Poetik*.

Mit der Harmonie der Sphären kommt nun die Zeit ins Spiel, das dritte Stichwort dieses flüchtigen Streifzugs. Denn selbst wenn Aristoteles die pythagoreische Lehre aus naturwissenschaftlichen Gründen verwarf, ist seine physikalische Definition der Zeit doch geschichtlich kaum ohne sie zu denken. Die Zeit, sagt er in etwa, sei die Zählbarkeit von Bewegung, und das natürliche Maß dieser Zählbarkeit sei zuhächst der gesetzmäßige Umschwung des Sternenhimmels. Nun ist die Musik als solche, bei der also weder die tänzerische Geste noch die Bedeutung der gesungenen Worte in Betracht kommt, gewissermaßen Bewegung ohne Bewegtes, reine Bewegung. Sonach wäre Musik nicht nur eine Zeitkunst – das sind Tanz, Poesie und, wenn Sie wollen, der Film ebenfalls –, sondern die (in mathematische Harmonie gesetzte) wahrgenommene Zeit selbst.

Wenn Kant also der Musik einen gewissen Mangel der Urbanität, der bürgerlichen Gesittung, anlastete, da sie „ihren Einfluß weiter, als man ihn verlangt“ ausbreite, dann darum, weil sie der getilgte Raum, die getilgte Distanz ist, auch wenn wir metaphorisch von „hohen“ und „tiefen“ Tönen sprechen und, wie im Fall der venezianischen Mehrchörigkeit, extrem stereophon hören: woher sie immer kommen mag, sie ist in mir (während das Auge alles außer mir findet). Kant vergleicht sie darum unmittelbar einem sich ausbreitenden Geruch:

Der, welcher sein parfümiertes Taschentuch aus der Tasche zieht, traktiert alle um und neben sich wider ihren Willen, und nötigt sie, wenn sie atmen wollen, zugleich zu genießen.

Unverblümter läßt Queneau seinen Gabriel die Geschichte von *Zazie in der Métro* mit dem angewiderten Aufschrei eröffnen: „Woherstinksnsso ...“ Auch der Geruch tilgt nämlich den Raum, aber nur als eine, obzwar mehr oder minder intensive, Qualität. Das hat aber Kant und Schopenhauer wie dann auch Busch offenbar nicht besonders gestört. Daß die Hölle in schlechtem Geruch steht, ist sozusagen in der Ordnung, wahrhaft diabolisch hingegen der Einfall Shaws, dieses großen Musikfreunds, den Teufel in seinem Stück *Mensch und Übermensch* die ganze Hölle pausenlos unter Musik von Mozart setzen zu lassen.

Geräusch rückt uns eben nicht nur wie Geruch auf den Leib, geht uns nicht nur wie Nässe und Kälte auf die Knochen. Es dringt uns, wie man sagt, bis ins innerste Mark; eine Erfahrung, die die Menschen lange vor der Erfindung des Preßlufthammers gemacht haben. Ist Geräusch zwar nicht stets mit Musik, Musik aber, nehmen wir Busch beim Wort, stets mit Geräusch verbunden, dann empfinden wir sie offenbar immer dann als Geräusch, wenn wir ihre Harmonie, die proportionierte Stimmung der Töne, nicht in uns aufnehmen mögen oder können – wenn wir zum Beispiel mit einem ungewohnten harmonischen System konfrontiert werden. So mag denn manchem Braunschweiger, der eine Aufführung der *Götterdämmerung* nur ungern versäumt, die Vergabe des Spohr-Preises als ein zwar politisches, sonst aber eher geräuschvolles Ereignis im Gedächtnis haften bleiben.

Finden wir also wie Buschs „Gärtner namens Knoll“ Musik „nicht schön“, dann käme das nach allem daher, daß wir die Zeit selbst ohne gehörige Ordnung, oder die Welt in solch mißlichen Augenblicken nicht pythagoreisch als Kosmos, sondern als Chaos wahrnehmen, und Geräusch wäre an sich einfach die wahrgenommene Unordnung im Sich-Zeitigen der Welt. „Zuerst entsprang das Chaos“, ließ sich Hesiod von den Muses ein gutes Jahrhundert vor dem Entstehen der Philosophie belehren. Allerdings hatte Chaos bei ihm noch die ursprüngliche Bedeutung des klaffenden Abgrunds, den die alten Orphiker aus der Zeit selbst entspringen ließen. Orpheus galt den Griechen als der Erfinder der Musik.

Jedenfalls haben wir es beim chaotischen Abgrund zuletzt mit der Zeit zu tun, und das Gefühl des Abgrunds der Welt – die ihm entsprechende „Stimmung“ werden Kierkegaard und Heidegger als die Angst beschreiben – ist, scheint es, der erhabene Gemütszustand schlechthin. Kant bemerkt, das Erhabene sei „gleichsam ein Abgrund“ für die Einbildungskraft, „worin sie sich selbst zu verlieren fürchtet“. Im Abgrund, soll er mehr sein als bloß eine ungeheure Tiefe, ist aber nichts zu sehen; weshalb Jean Paul in

der *Vorschule der Ästhetik* bemerkt, seine Bedrohlichkeit sei akustisch: „[...] das Ohr ist der unmittelbare Gesandte der Kraft und des Schreckens“. Man erlebt das „nach Noten“ beim *Dies irae* in Verdis *Requiem*. Aber gar nicht „nach Noten“ gehört dazu auch, was Busch beim Schweineschlachten so entsetzt hat: „[...] röchelnde Entsagung; zuletzt Stille mit Nachdruck“.

Allerdings kann das Entsetzliche jederzeit aus dem Abgrund des Erhabenen auftauchen (wie in Melvilles *Moby Dick* nachzulesen). Wir brauchen dann erst einmal Zeit, um „uns zu fassen“, während das Gefühl des Erhabenen zu verlangen scheint, daß wir gefaßt sind und bleiben. Nach Kant verhält es sich aber so, daß dies Gefühl vielmehr das ausgehaltene Entspringen der Fassung ist, so daß wir hier nicht so sehr von einem gefaßten Gefühl als vom Gefühl des Sich-Fassens zu sprechen haben. Das Erhabene ist nämlich bewegend, und diese Bewegung kann, sagt Kant, „mit einer Erschütterung verglichen werden, d. i. mit einem schnellwechselnden Abstoßen und Anziehen ebendesselben Objekts“. Nur ist das Einzigartige an diesem Gefühl, daß es genau genommen kein Objekt hat; denn darauf läuft die tiefsinnige Analyse der *Kritik der Urteilskraft* hinaus, daß das Gefühl des Erhabenen als dem Abgrund entspringend das ursprüngliche Selbst-Gefühl ist. Hegel wird es in der *Phänomenologie des Geistes* so formulieren: Das Bewußtsein hat

nicht um dieses oder jenes [...] Angst gehabt, sondern um sein ganzes Wesen; denn es hat die Furcht des Todes, des absoluten Herrn, empfunden. Es ist darin innerlich aufgelöst worden, hat durchaus in sich selbst erzittert, und alles fixe hat in ihm gebebt. Diese reine allgemeine Bewegung, das absolute flüssigwerden alles Bestehens ist aber das einfache Wesen des Selbstbewußtseyns [...]

Womit Schopenhauers zunächst befremdliche Beteuerung verständlich wird, unter allen Künsten rede einzig die Musik vom „Wesen“. Das Wesen der Welt wie des Individuums hatte er ja in den Willen zum Leben gesetzt, und Kant hatte vordem notiert, das Leben sei „nichts als Begehrungsvermögen in der geringsten Ausübung“. Entsprechend hat Kant jene Erschütterung durch das Erhabene erklärt mit einer augenblicklichen und augenblicklich überwundenen „Hemmung der Lebenskräfte“. Das ist das im achtzehnten Jahrhundert so gerühmte Gefühl der Rührung, und als das „schnellwechselnde“ Über-sich-hinaus und In-sich-zurück der Einbildungskraft oder als die sich fühlende Reflexion ist die Rührung das reine Sich-Erscheinen der „Rezeptivität“, der Empfänglichkeit des Selbst, also das, was bei Kant der „innere Sinn“ heißt, dessen Form die Zeit ist.

Indem Hegel diese produktive Erschütterung nun auch In-sich-selbst-Erzittern nennt, denkt er sie zum einen als das Entspringen der Seele. Denn diese „Bewegung wendet sich als Fortgehen unmittelbar in ihr selbst um, und ist nur so Selbstbewegung“, und daß dies die Seele sei, „Selbstbewegung“, hatte, pythagoreischer Tradition folgend, bereits Platon gelehrt. Zum andern ist die so entspringende Seele ebenso unmittelbar Klang, denn der Klang, heißt es in Hegels Naturphilosophie, ist „das innere Erzittern des Körpers in ihm selbst“ und als das Übergehen der Räumlichkeit des Körpers in die Zeitlichkeit und so ins Fürsichsein seine „Seelenhaftigkeit“.

Ohne noch neuere Zeugen aufzurufen – Nietzsche vor allem und Adorno wären hier zu nennen –, mag doch schon deutlicher geworden sein, warum gerade die Musik es ist, die unter allen Künsten die Macht hat, uns im Innersten zu erschüttern, nicht nur zu berühren. Denn sie ist die Ordnung der wahrgenommenen Zeit selbst. Diese Ordnung erwies sich in ihrer einfachsten Gestalt als das In-sich-Zurückbeben vor dem Chaos, vor der Zeit als dem alles verschlingenden Abgrund; und dies Zurückbeben, zurück in ein Sich, das erst im Zurück entspringt, diese ursprüngliche Reflexion ist es also, die Kant den inneren Sinn, Hegel „das einfache Wesen des Lebens, die Seele der Welt“ nannte. Das eine wie das andere ist die zum Augenblick in sich gewandte Zeit, gleichsam der zum haltenden Grund gefaltete Abgrund. Oder sagen wir, der Abgrund sei das Sich-Entziehen, die Abwesenheit von allem, seine Einfaltung aber die Anwesenheit, dann ist die zu Stande gebrachte Zeit die in sich erinnerte Abwesenheit, das Gedächtnis, die *Mnemosyne*, die den Griechen die Mutter der Musen war und den Orphikern sogar für das Leben selbst galt: die ursprüngliche Musik.

So spannt sich ein geschichtlicher Bogen von Parmenides' Lehre im frühen fünften vorchristlichen Jahrhundert, die Welt sei die Dimension zwischen dem in sich gefalteten Licht des Äthers und der bewußtlosen Nacht, zu den Versen aus Shakespeares *Kaufmann von Venedig*.

[...] Drum lehrt der Dichter,  
Gelenkt hab' Orpheus Bäume, Felsen, Fluten,  
Weil nichts so stöckisch, hart und voll von Wut,  
Das nicht Musik auf eine Zeit verwandelt.  
Der Mann, der nicht Musik hat in ihm selbst,  
Den nicht die Eintracht süßer Töne rührt,  
Taugt zu Verrat, zu Räuberei und Tücken;  
Die Regung seines Seins ist dumpf wie Nacht,  
Sein Trachten düster wie der Erebus.  
Trau' keinem solchen! – Horch auf die Musik!

Und wenn Hamlet nicht ausruft: Die Welt ist aus den Fugen, sondern „Die Zeit ist aus den Fugen“ – *The time is out of joint* –, dann deutet dies auf seine eigene innerste Unordnung und bereitet uns vor für Orphelias Klage: „Oh, welch ein edler Geist ist hier zerstört!“

Das läßt uns zum Schluß vielleicht noch den kleinen und scheinbar bloß individuellen Unterschied zwischen Kants und Buschs (schon Schopenhauer folgender) Kritik an der Musik besser verstehen. Das zuzeiten Störende an der Musik war für den einen die Distanzlosigkeit, die, will man nicht sein Gedankengeschäft niederlegen, mitzusingen nötigt, für den andern das Geräusch, mit dem sie „stets“ verbunden sei. In seiner Analyse des Klangs sagt Hegel nun:

Das kohäsionslose Wasser ist ohne Klang, und seine Bewegung als bloß äußerliche Reibung seiner schlechthin verschiebbaren Teile gibt nur ein Rauschen.

Kants Kritik ist gewissermaßen politisch: indem die Musik die Distanz der Räumlichkeit tilgt, hebt sie zugleich das Fürsichsein des Individuums in eine unmittelbar sich führende, gleichsam in eine vor-logische Gemeinschaft auf. Buschs Kritik hingegen ist



weltanschaulich: in aller Ordnung hört er den amorphen Grund, das heißt eigentlich den Ungrund, von Welt und Ich mit, das bloße Rauschen ihrer Kohäsionslosigkeit.

Besonders wird das Saitenspiel  
Dem Nebenmenschen oft zuviel.

Darin treffen sich geschichtlich Wilhelm Busch und Stefan George, denen man sonst kaum Gemeinsamkeit bescheinigen möchte:

Schon sausen winde in den letzten arven ·  
Der aufstieg im geröll wird rauher wüster . .  
Wo jede wegs pur sich verliert im düster  
Summen des abgrunds dunkle harfen.

Aber ehe ich mich weiter verirre, will ich lieber Shakespeare das Wort lassen, der tief über die Musik und vielleicht am tiefsten über die Zeit nachgedacht hat:

Wie süß das Mondlicht auf dem Hügel schläft!  
Hier sitzen wir und lassen die Musik  
Zum Ohre schlüpfen; sanfte Still' und Nacht,  
Sie werden Tasten süßer Harmonie.  
Komm, Jessica! Sieh, wie die Himmelsflur  
Ist eingelegt mit Scheiben lichten Goldes!  
Auch nicht der kleinste Kreis, den du da siehst,  
Der nicht im Schwunge wie ein Engel singt,  
Zum Chor der hellgeaugten Cherubim.  
So voller Harmonie sind ew'ge Geister:  
Nur wir, weil dies hinfäll'ge Kleid von Staub  
Sie grob umhüllt, wir können sie nicht hören.

Ich wünsche Ihnen und uns allen ein gehörig-harmonisches Jahr.



GERHARD OBERBECK, Ellerbek

## **Der Großraum Hamburg – Genese sowie aktuelle Probleme der Planung und ihrer Realisierung**

Braunschweig, 20. März 1992\*

Der Großraum Hamburg besteht aus dem Stadtstaat und den angrenzenden niedersächsischen sowie schleswig-holsteinischen Gemeinden. Damit ist jene Region charakterisiert, in der Siedlung, Wirtschaft und Verkehr von Hamburg abhängig sind oder von dieser Stadt entscheidend bestimmt werden. Hinsichtlich der Ausdehnung handelt es sich um einen Kreis, der über einen Radius von etwa 40 km verfügt. Dieser entspricht im wesentlichen dem Nahverkehrsbereich der öffentlichen Verkehrsmittel Hamburgs, geht aber an einigen Stellen darüber hinaus.

Das Gesamtareal dieses Raumes beläuft sich auf etwa 5050 km<sup>2</sup>, wobei zu betonen ist, daß auf das Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg nur rund 750 km<sup>2</sup> entfallen. Die Bevölkerungszahl im Großraum ist mit 2,7 Millionen (1992) anzusetzen; etwa 1,65 Millionen entfallen dabei auf Hamburger Gebiet. Von den rund 1 Million Einwohnern des Umlandes sind mehr als zwei Drittel im Gebiet nördlich der Elbe und nur knapp ein Drittel südlich des Stromes zu lokalisieren.

Die geographisch-genetische Analyse läßt erkennen, daß sich die Entwicklung Hamburgs vom Mittelalter bis in das 19. Jahrhundert vor allem auf den Geestrücken und in den Flußmarschen nördlich der Elbe vollzog. Dementsprechend ergab sich als „natürliches“ Hinterland der Stadt der Bereich des heutigen Schleswig-Holsteins und Mecklenburg-Vorpommerns; die Bedeutung Niedersachsens war von jeher geringer.

Einen wesentlichen Aufschwung bescherte Hamburg während der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts die Anlage des Hafens südlich der Elbe sowie – besonders auch im 20. Jahrhundert – die Industrialisierung. Das planerisch und letztlich auch wirtschaftlich einschneidendste Ereignis war das Groß-Hamburg-Gesetz von 1937, das die noch heute bestehende Grenzziehung festlegte. Es bestimmte die Gebietsteile, die vom damaligen Preußen an Hamburg abgegeben wurden, nämlich die Stadtkreise Altona, Harburg und Wandsbek sowie 27 Gemeinden der Landkreise Stormarn, Pinneberg, Harburg und Stade. Hingegen trat Hamburg von seinem Areal die Stadt Geesthacht, die Gemeinden Großhansdorf und Schmalenbeck, Cuxhaven, Neuwerk sowie fünf Gemeinden des Amtes Ritzebüttel ab. Damit vergrößerte sich das hamburgische Gebiet auf 74.500 ha, d.h. um fast 33.000 ha. Die Bevölkerungszahl stieg um 407.000 Einwohner auf 1,68 Millionen an.

Der Ausbruch des zweiten Weltkrieges 1939 und die schwerwiegenden Zerstörungen von Wohn- und Industrievierteln sowie weiten Teilen des Hafens machten alle Planungsvorhaben zunichte. Hinzu kam nach 1945 die Zonengrenzziehung und später die

---

\* Vortrag vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (Zusammenfassung)

hermetische Abtrennung zur DDR. Hamburg verlor damit wirtschaftlich sein östlich gelegenes Absatzgebiet; die ost-west-verlaufenden Verkehrslinien wurden nahezu bedeutungslos. Die Umorientierung führte notgedrungen zu einem verstärkten Ausbau der Nord-Süd-Achsen. Dennoch konnte die Lücke des Autobahnnetzes im Sinne einer für den Hafenanschluß wichtigen Südverbindung erst 1960 – bei Hannover – geschlossen werden.

Die Basis für den Wiederaufbau und die Weiterentwicklung Hamburgs bildete nach dem zweiten Weltkrieg der Aufbauplan, der 1960 von der Bürgerschaft, dem hamburger Parlament, verabschiedet wurde. Die für 1985 erwartete Einwohnerzahl von 2,2 Millionen konnte nie erreicht werden. Im Gegenteil: einem Anstieg der Bevölkerung auf einen Maximalwert von 1,86 Millionen (1964) folgte ein ständiger Schwund von 8000 bis 12.000 Menschen pro Jahr mit dem Ergebnis, daß gegen Ende der achtziger Jahre die Stadt unter 1,6 Millionen Einwohner zählte. Erst die Öffnung der Grenzen im Osten und die Vereinigung der „alten“ Bundesrepublik mit den neuen Bundesländern führten zu einer erneuten Zunahme der Bevölkerung. Wenn die Stadt heute (1992) wieder der Einwohnerzahl von 1,7 Millionen zustrebt, so ist dies u.a. auch dem Problem der Asylanten, Aussiedler und Wirtschaftsflüchtlinge zuzuschreiben, auf das hier nicht näher eingegangen werden soll.

Die Planung von Hamburg und seinen Randgebieten in den benachbarten Bundesländern zeichnete sich in form von Entwicklungsachsen ab, deren Konzept im Prinzip auch gegenwärtig noch Gültigkeit besitzt. Im einzelnen handelt es sich um folgende Achsen und deren Endpunkte:

1. Hamburg – Pinneberg – Elmshorn (Nordwest)
2. Hamburg – Kaltenkirchen (Nord)
3. Hamburg – Bad Oldesloe (Nordost)
4. Hamburg – Schwarzenbek (Ost)
5. Hamburg – Geesthacht (Ost)

Südlich der Elbe wurden die drei Satellitenstädte Buxtehude, Winsen an der Luhe und Buchholz in der Nordheide mit einbezogen und seit 1969 zu den folgenden drei Achsen ergänzt:

6. Hamburg-Harburg – Buxtehude – Stade
7. Hamburg-Harburg – Bucholz i. d. Nordheide
8. Hamburg-Harburg – Lüneburg

Die für den Großraum vorrangigen Planungsprojekte wurden seit dem Beginn der sechziger Jahre in Angriff genommen. Ziel war es, nicht nur den Hafen und seine wirtschaftlich-technischen Gegebenheiten, sondern vor allem den industriellen und den Energiesektor leistungsfähiger zu gestalten. Ferner ging es um eine Verbesserung der Wohnmöglichkeiten der Bevölkerung, auch unter der Perspektive einer geringeren Umweltbelastung.

Ein Teil dieser Pläne ist inzwischen abgeschlossen worden. Hierzu gehören:

Elektrifizierung der Eisenbahnstrecken über Lüneburg nach Hannover und über Buchholz nach Bremen,

Bau des Güterbahnhofs Meckelfeld-Maschen,  
 Bau des Elbeseiten-Kanals (damals Nord-Süd-Kanal),  
 Bau der beiden Oberwassersammler „Nordheide“ und „West“,  
 Bau des Elbtunnels und der Autobahn „westliche Umgehung“; – der 1975 in Betrieb  
 genommene Verkehrsweg genügt mit seinen drei Tunnelröhren schon seit 1985  
 nicht mehr den Anforderungen. Der Bau einer vierten Röhre wird verlangt und  
 ist geplant.

Der Bau des Flughafens Kaltenkirchen, der bereits in den siebziger Jahren eröffnet  
 werden sollte, wurde leider niemals ernsthaft in Angriff genommen: ein schwerwie-  
 gender Fehler.

Der Bau eines Tiefwasser-Vorhafens Neuwerk ist ebenfalls nicht über Vorüber-  
 legungen hinausgekommen, vor allem auch im Hinblick auf Umweltbelastungen.

Insgesamt war es Ziel dieser Planung, die periphere Lage des Großraumes Ham-  
 burg innerhalb der „alten“ Bundesrepublik Deutschland zu verbessern und die Region  
 in wirtschaftlicher Hinsicht konkurrenzfähig zu erhalten. Die Entwicklung der letzten  
 zwei Jahre, der Fall der Grenze zur ehemaligen DDR und Kontakte zu den neuen  
 Bundesländern haben die Verhältnisse grundsätzlich geändert. Für Hamburg ergibt  
 diese Tatsache, daß die alten West-Ost-Verbindungen wiederbelebt und das ehemalige  
 Hinterland neu erschlossen werden.

In welchem Umfange besonders für die Verkehrswege Renovierungen, Um- und  
 Neugestaltungen vorzunehmen sind, wurde bereits im April 1990 in der Akademie für  
 Raumforschung und Landesplanung aufgezeigt. Im einzelnen handelt es sich um:

### 1. Schienenverkehr (Ausbauten)

- a) Hamburg – Lübeck – Rostock – Stralsund
- b) Hamburg – Ludwigslust – Wittenberge – Berlin
- c) Hannover – Wolfsburg – Stendal – Berlin
- d) Hannover – Braunschweig – Magdeburg – Dessau – Leipzig
- e) Wolfsburg – Magdeburg

### 2. Straßenverkehr (Aus- und Neubauten)

- a) Lübeck – Rostock – Stralsund – Saßnitz
- b) Uelzen – Dömitz (neue Elbbrücke 1992) – Ludwigslust – Wismar
- c) Ludwigslust – Wittenberge – Stendal – Magdeburg – Halle
- d) Vienenburg – Bad Harzburg – Quedlinburg

### 3. Binnenschiffsverkehr

Aktivierung der Elbeschifffahrt, wobei der 1976 eröffnete Elbseiten-Kanal in stär-  
 kerem Maße als bisher genutzt werden wird.

Für den Großraum Hamburg ist festzuhalten, daß es sich nicht nur um einen Wirtschafts-  
 standort mit Hafenorientierung, sondern vor allem um einen Industriebereich mit  
 besonderen Schwerpunkten handelt, die ihre Dependancen besonders auch in Sachsen-  
 Anhalt und in Mecklenburg-Vorpommern zu stützen haben. Daß diese Aufgaben unter  
 den heutigen, von strukturellen Schwierigkeiten – besonders im östlichen Bereich –

belasteten Gegebenheiten nur mit großer Finanzkraft zu bewältigen sind, ist sicherlich Hamburgs besondere Verpflichtung. Positiv in dieser Hinsicht ist, daß die Hansestadt eine Zentrale mit „Monopolfunktion“ darstellt, die besondere Bereiche wie Bank- und Versicherungswesen, Verwaltung, Kultur, Medien und Verlagszentren umfaßt.

Insgesamt ist herauszustellen, daß Hamburg seine damalige Funktion als Mittler von Verkehr und Wirtschaft vom westlichen zum östlichen Kulturraum wiedererlangt hat oder zumindestens wieder anstrebt.

### Literatur

1. *Braun, A.*: Hamburg-Uhlenhorst: Entwicklungen und Sozialstruktur eines citynahen Wohnquartiers. In: *Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft in Hamburg*, Bd. **59**, 1972.
2. *Braun, P.*: Die sozialräumliche Gliederung Hamburgs. In: *Weltwirtschaftliche Studien aus dem Institut für europäische Wirtschaftspolitik der Universität Hamburg*, Heft 10, **1968**.
3. *Deutscher Planungsatlas, Band 8: Hamburg*. Herausgeber: Akademie für Raumforschung und Landesplanung der Freien und Hansestadt Hamburg. Baubehörde. – Hannover 1978.
4. *Oberbeck, G.*: Erholungs- und Grünflächen im Großraum Hamburg – ihre Abhängigkeit von Entwicklung und Planung. In: *Städtisches Grün in Geschichte und Gegenwart. Veröffentlichungen der Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Forschungs- und Sitzungsberichte) Band 101* (1975).
5. *Oberbeck, G.*: Der Großraum Hamburg. Entwicklung und Planung unter besonderer Berücksichtigung von Industrie und Hafen. In: *Berichte zur deutschen Landeskunde*, Band **53**, Heft 2 (1979).
6. *Oberbeck, G.*: Verkehrsentwicklung und Planung im Großraum Hamburg. In: *Siedlungsforschung, Archäologie – Geschichte – Geographie*, **4** (1986).
7. *Oberbeck, G.*: Zielkriterien administrativer Raumgröße und Abgrenzung. In: *Behördliche Raumorganisation seit 1800. Veröffentlichungen der Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Forschungs- und Sitzungsberichte)*, Band **171** (1988).
8. *Oberbeck, G.*: Städtische Siedlung, Wirtschaft und Planung in Vergangenheit und Gegenwart (Hamburg). In: *Joachim Jungius – Gesellschaft der Wissenschaften Hamburg, Jahresbericht 1990*.
9. *Oberbeck, G.*: Naturgeographische Gegebenheiten im Bereich der Elbe – ihre Bedeutung für Siedlung, Wirtschaft und Verkehr. In: *Die Elbe – ein Lebenslauf. Katalog zur Ausstellung des Deutschen Historischen Museums in Dresden, Hamburg und Prag*. Berlin 1992.

---

Prof. Dr. G. Oberbeck  
Ginsterweg 4 · W2087 Ellerbek

JUSTUS HERRENBERGER, Braunschweig

## Die Baustelle „Alte Waage“ in Braunschweig

Braunschweig, 24. April 1992\*

Am Freitag, dem 24. April 1992, wurde anlässlich der Plenarsitzung der BWG die Baustelle der „Alten Waage“ besichtigt. Was ich dabei alles erzählt habe, versuche ich nun aus dem Gedächtnis aufzuschreiben:

Meine sehr geehrten Herren,

die Führungen auf der Baustelle der „Alten Waage“ beginne ich immer mit einem Satz des französischen Bildhauers Auguste Rodin:

„Eine große Zeit restauriert nicht alte Kunstwerke, sie schafft neue.“

Da muß man angesichts dessen, was hier geschieht, ganz schön schlucken, denn dieser Wiederaufbau der Alten Waage ist nicht einmal eine Restaurierung, sondern eine Kopie, ein völliger Neubau nach altem Vorbild und anhand verschiedener Unterlagen, vor allem von Fotografien

Große Zeit? in der Kunst? – möglich, in der Stadtbaukunst sicher nicht.

Schauen Sie sich bitte einmal das chaotische Neben- und Durcheinander der nach dem Krieg entstandenen Bauformen, den gemischten Baustoffsalat entlang der „Langen Straße“ (Packhof, Obi, Wullbrandt u. Seele, Glitzerding der LBZ) an. Insofern fühle ich mich bei der Rekonstruktion der Alten Waage an den schönen Satz von Rodin nicht gebunden. Im Gegenteil, das Nebeneinander von St. Andreas und der Alten Waage war eine großartige Leistung der Stadtbaukunst. Der einst 122 m hohe Südturm, der „Lange Andreas“ und die Alte Waage sind gleichzeitig während der Reformation, möglicherweise von demselben Baumeister, Bernard Tafelmaker, gebaut. Hierzu einige Daten: 1517 Bekanntmachung der Thesen Luthers in Wittenberg. 1518–32 die beiden obersten Geschosse des Südturmes, 1528 Reformation in Braunschweig, 1531–47 Braunschweig im Schmalkaldischen Bund, 1534 Alte Waage (Datum auf der Schwelle am Südgiebel), 1538 Schmalkaldische Bundesversammlung im Neustadtrathaus, 1544 der „Lange Andreas“ durch eine Zeltpitze auf 122 m erhöht (1551 durch Sturm eingestürzt, 1559 um 14 m niedriger wieder aufgebaut, 1680 durch Blitz zerstört, die jetzige Barockhaube von 1742, die Jahreszahl und das „C“ weisen auf Herzog Carl I., den Begründer unseres Collegium Carolinum hin. Die im 2. Weltkrieg wiederum zerstörte Barockhaube wurde 1950 von Prof. Georg DRÖGE, Salzgitter, der auch die Statik für die Alte Waage bearbeitet hat, rekonstruiert).

Das ungleiche Paar St. Andreas/Alte Waage ist ein historisch ganz wichtiges, vielleicht auf der ganzen Welt einmaliges Zeugnis protestantischer Kirchen- und Stadtbaukunst; für die Stadt- und Stadtbaugeschichte Braunschweig von symbolhafter Bedeutung.

---

\* Vortrag vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft



Carl Weisz (1804–1891)

*Die Alte Waage, um 1836. – Öl auf Leinwand, 75 x 54,4 cm*

Vor etwa 10 Jahren sprach mich der kürzlich verstorbene Stadtbaurat Konrad WIESE an: Er wolle die Alte Waage wieder aufbauen, was ich dazu meine, ob ich mit-helfen würde. Er könne mir zwar keinen Auftrag geben, es könne auch schiefgehen.

Ich sagte zu, wohlwissend, daß es allerhand Ärger geben würde.

Ich hatte nicht schon seit 1947/48 mit der Alten Waage beschäftigt, damals noch als Assistent bei Prof. F.W. KRÄMER. Wollmarktwettbewerb, Wiederaufbau der lieben alten Fachwerkstadt oder zeitgemäßer Neubau? Dazu die Frage: alte Alte Waage, überhaupt keine Alte Waage, moderne Alte Waage mit Stahl und viel Glas? Daß vor dem



mächtigen Westwerk ein maßabsteigerndes feingliedriges Haus, das zugleich den überlangen Platz unterteilte, erwünscht sei, war unumstritten.

Es gab dann 1974 noch einen Wettbewerb, da kam aber für die Alte Waage nichts wesentliches heraus.

1980 sollte es wieder losgehen. Ein Bebauungsplan wurde gestartet. Ein Programm und ein Bauherr wurden gesucht. Der um die Rettung vieler Braunschweiger Baudenkmäler verdiente Ehrenbürger der Stadt, Dr. WISWEDEL, zeigte Interesse und bestellte ein Gutachten bei der „Arbeitsgruppe Altstadt“.

Der Präsident der TU, Prof. Dr. Bernd REBE, wurde angesprochen und war bereit, das Projekt zu unterstützen. Ein Vorentwurf „Gästehaus der TU“ entstand. Ich hatte vor über 20 Jahren die Ruine der Villa Löbbecke als Gästehaus für die Hochschule ausgebaut. Das war inzwischen viel zu klein. Ein Förderverein wurde gegründet, die Ratsfraktionen sagten nicht Nein. Die Kosten wurden auf 8,5 Millionen geschätzt. Die Finanzierung war sehr schwierig, der Hochschulbund (Träger des Gästehauses Villa Löbbecke) winkte ab. Der Brocken sei zu groß.

Inzwischen gab es viel Lärm. Die Architekturprofessoren waren entsetzt. Sie forderten Modernes. Man zerfetzte mich in öffentlicher Diskussion; Leserbriefe, Gegenvorlesungen, Studentenwettbewerbe.

Dann kam alles anders: Im Frühjahr 1987 rief mich der damals noch als Stadtkämmerer tätige Dr. BRÄCKLEIN zu sich. Er saß ganz traurig in seinem Dienstzimmer vor einem Neubauentwurf für eine Volkshochschule. 6 bis 7 Millionen, Leasing, d.h. nicht ganz für umsonst. Außerdem stünden Schulen leer und müßten geschlossen werden. Ihm war nicht nach Neubau zumute.

Ob ich nicht einmal versuchen wolle, wie sich ein reduziertes Raumprogramm der Volkshochschule in der Alten Waage unterbringen lasse. Ich machte einen Vorentwurf, holte die Zustimmung der Volkshochschule. Oberstadtdirektor KÖRNER, Oberbürgermeister GLOGOWSKI fanden das Projekt gut, fast der ganze Rat stimmte zu. Da es inzwischen gelungen war, die Neustadt in das Städtebauförderungsprogramm aufzunehmen und damit auch Land und Bund in die Finanzierung der Alten Waage einzubinden, herrschte Zuversicht.

Daß die offizielle Denkmalpflege die kalte Schulter zeigte, die neue Alte Waage sei kein Denkmal (siehe Leibniz-Haus in Hannover), trübte zwar die Stimmung.

Richtig düster wurde es, als der Bebauungsplan festgesetzt wurde. Nun hatten die Nachbarn eine Rechtsgrundlage, gegen den Bebauungsplan zu klagen.

Die Abstände wären zu knapp. Die Stadt verhandelte, kaufte auch einige Wohnungen, es half nichts. Sie verlor in der 1. Instanz vor dem Verwaltungsgericht. Es ging vor das Obergerverwaltungsgericht Lüneburg, ein Ortstermin wurde abgehalten, das Gericht gab der Stadt Recht.

Es kam noch zu einer Wiederzulassungsbeschwerde beim Bundesverwaltungsgericht in Berlin. Diese wurde abgelehnt. Erst mit dem Eintreffen der Begründung konnte der Startschuß im Spätherbst 1990 gegeben werden.

Die Wartezeit war genutzt worden, einmal für die Planung, Detailbearbeitung und Ausschreibungsunterlagen, dann aber vor allem für eine gründliche archäologische Untersuchung. Der Bauplatz wurde die schönste Grabungsstelle Deutschlands unter einem großen Schützenzelt, Warmluftheizung und Beleuchtung. Die wissenschaftliche Auswertung läuft noch, für uns war interessant:

Fundamente und Pflaster des Vorläuferbaues um 1400, Stützenfundamente, um zu wissen, hatte die Alte Waage eine, zwei oder drei Stützenreihen?

Der Unterbau der Brückenwaage unter der Däle vom Anfang des 19. Jahrhunderts.

Ein Knüppeldamm in etwa 2 m Tiefe vor dem Südgiebel.

### **Gründung**

Die Alte Waage hatte keinen Keller. Für die heutige Nutzung (Versorgung, Entsorgung) geht's nicht ohne Keller.

Wir kamen ins Grundwasser. Eine Spundwand konnte wegen der Nachbarhäuser und der Nähe zur Kirche nicht gerammt werden. So wurde die Grube mit einer Schlitzwand im Betonitverfahren verbaut, die zugleich die äußere Schalung für die weiße Wanne bildet.

### **Holz**

350 cbm Eichenkantholz werden gebraucht, erhebliche Dicken 40/40, 30/30. Die z. T. sehr komplizierten Holzverbindungen waren aus alten Veröffentlichungen bekannt.

Prof. DRÖGE, Salzgitter, berechnete und konstruierte das Tragwerk; hierfür bestimmte er die Kennwerte in seinem Labor. Es gab überraschende Erkenntnisse über die Tragfähigkeit von Holznägeln.

Ich hatte bisher geglaubt, und dies meinen Studenten eingeredet, ein Holznagel könnte nur geringe Zugkräfte aufnehmen, da die kurzen Fasern des Zapfens am Bohrloch bei Zug sofort ausscheren. Das Experiment brachte ein anderes Ergebnis. Bei Zugbeanspruchung verformt sich zunächst der Holznagel U-förmig wie ein Drahtbügel. Kurz vor dem Bruch reißen die Längsfasern neben dem Holznagel auf. Voraussetzung ist allerdings, daß vorgetrocknete, paßgenaue Holznägel in das noch gleichsweise feuchte Holz eingetrieben werden. Prof. DRÖGE konnte aus seinen Experimenten die Rechenwerte für die Holzkonstruktion ableiten. Trotzdem reichte das für die neue Konstruktion nicht aus. Die Zimmerleute bauten 1534 mit Erfahrung und Gottvertrauen. Heute müssen die aus dem Wind entstehenden (Orkan) Zugkräfte rechnerisch nachgewiesen werden. So mußten im Erdgeschoß zusätzliche, andreas-kreuzähnliche Diagonalstreben eingebaut werden. Bei der Unterbrechung des Fachwerksystems durch das massive Treppenhaus ging's nicht ohne versteckte Prothesen aus nichtrostendem Stahl.

Als übergeordnetes Konstruktionsziel sollte gelten: Das Fachwerk trägt sich allein und steift sich selber aus, der unumgängliche massive Treppenhauskern wird nicht zur Aussteifung herangezogen. Die während des Richtens noch fehlende Auflast durch

Decken und Ausmauerung mußte durch nachstellbare Zuganker simuliert werden. So konnten die Zimmererarbeiten anhand der Holzliste und genauer Detailpläne ausgeschrieben werden. Die Arbeitsgemeinschaft der drei Braunschweiger Zimmereibetriebe WREHDE, HOFFMANN und KEMPER (Remme) bekam den Zuschlag.

Wegen der Holzbeschaffung hatte ich nächtelang schlecht geschlafen. Wo kriege ich nur soviel Holz her? Was sage ich den GRÜNEN? Ich hätte schlafen können. Die Holzbeschaffung war problemlos. Die Eisenbahn braucht keine Eichenschwellen mehr, Eiche ist inzwischen in der Möbelindustrie nicht mehr Mode, Windbruch hatte die Lager der Holzhandlungen gefüllt. Die Eichen sind etwa 200 bis 300 Jahre alt, quitschnaß, das Holz wird kräftig schwinden. Nach 10 Jahren wird die Alte Waage 8–12 cm niedriger sein (Knochenhauer-Amtshaus 18 cm). Auf dieses Schwinden muß man beim massiven Treppenhaus und dem Aufzug durch Einbau einer Gelenkplatte Rücksicht nehmen.

Risse und Spalten in den Außenwänden sind bei einem Holzbau nicht zu vermeiden. Deshalb muß die Alte Waage in 5 bis 10 Jahren noch einmal eingerüstet werden, dann wird die Fassade nachgebessert, und die Malerarbeiten werden vollendet. Früher war die Alte Waage ein Speicherraum, dessen Durchlüftung willkommen war. Bei einer Volkshochschule hat man eine solche Dauerlüftung nicht so gern. Bei einem Holzbau trocknen die Innen- und Außenwände verschieden aus. Das könnte zu unangenehmen Schwunddifferenzen führen. Um dem vorzubeugen, wurde für die inneren Horizontalhölzer altes Eichenholz eingebaut.

Einige tausend Hölzer müssen zugerichtet und abgebunden werden, mehrere tausend z. T. sehr schwierige Holzverbindungen müssen hergerichtet werden. Das Ganze muß so organisiert sein, daß jedes Holz zur rechten Zeit an seiner ganz bestimmten Stelle gerichtet werden kann. Fast 2000 m Holznägel müssen eingetrieben werden. Die Hirnhölzer wurden mit einem Speziallack gestrichen, um das gleichmäßige Austrocknen quer zur Faser zu fördern. Die Zapfenlöcher an den Schwellen sind durch Bohrung drainiert, um stauendes Regenwasser abzuleiten.

Die Zimmerleute sind mit Begeisterung bei der Sache, ihr Können imponiert, die Alte Waage ist zugleich Lehrbaustelle. Auch für uns Architekten ist die Alte Waage eine Lehrbaustelle, könnte sie zumindest sein. Meine Bauingenieur-Kollegen haben das schnell begriffen. Für die riesige Aufgabe „Sanierung von Altbauten in den sog. Neuen Bundesländern“ könnte man aus der Alten Waage sehr viel lernen.

### **Blick zurück**

Seit wir uns selbst mit der Rekonstruktion der Alten Waage befassen, wächst unser Respekt vor dem noch unbekannten Zimmermeister und seinen Bauleuten von 1534. Die technische Leistung ist quantitativ und qualitativ gemessen an der auch damals kurzen Bauzeit von 2 bis 3 Jahren bewundernswert.

Die Eichen wurden in der Lehrer Wohld und im Kampstüh (Beienroder Wald) geschlagen. Das waren damals 250 bis 300 Jahre alte Bäume. Noch heute findet man dort einige inzwischen 700 bis 800 Jahre alte Zeitgenossen der Eichen der damaligen Alten Waage. Wir hoffen, daß einer einmal nachforscht, um den Namen dieses genialen

Zimmermeisters zu finden. Der Mann hatte den ganzen Bau im Kopf, wußte, wieviel Holz, in welchen Längen und Querschnitten er brauchte. Danach suchte er die Bäume heraus, ließ sie schlagen, rücken und mit Ochsesgespann nach Braunschweig transportieren. Mit Zwei-Mann-Sägen, Äxten und Querbeilen wurden die erforderlichen Querschnitte und Längen hergestellt. Der Zimmermeister hatte alles im Kopf und mußte seinen Leuten genau alle Holzverbindungen vorreißen. Für die etwa 10.000 Einzelhölzer mußten 30.000–40.000 Zapfen, Zapfenlöcher, Eckstöße mit Schrotsäge, Axt, Stecheisen und Klöppel hergerichtet werden. Jedes Holz mußte gekennzeichnet sein, da es ja nur an der Stelle, für die es abgebunden war, beim Richten eingebaut werden konnte. Nach dem Abbund auf dem Zimmerplatz wurden die fertigen Hölzer, die Stiele, Knaggen, Balkenköpfe, die Schwellen, Brüstungsriegel, Tor- und Lukeneinfassungen geschnitzt.

Das Richten der oft tonnenschweren Hölzer geschah mit Flaschenzug, pferdeangetriebenen Seilrollen oder Kränen, die mit Treträdern angetrieben wurden. Auf Pieter BRUEGHELs Bild des Turmbaues von Babel (1568) sind viele dieser Maschinen zu sehen. Zusammengehalten wurden die Hölzer durch Holznägel, für die etwa 1,2 km Löcher mit dem Löffelbohrer gebohrt werden mußten.

Wie haben die Leute damals gemessen? Es gab die Braunschweiger „ruthen“ (ca. 4,57 m), den Werkschuh (28,5 cm), Zoll und Linien. Die Leute konnten aber nicht rechnen. Adam Rieses „Rechnung auf der linien und feder“ war 1522 erschienen, das Rechnen, Addieren, Subtrahieren und das für den Fachwerkbau unverzichtbare Multiplizieren und Dividieren wurde noch nicht beherrscht. Bruch- und Dezimalrechnung, die das Einmessen der Gefache erleichtert hätten, war noch unbekannt. Es wurde viel mit dem Zirkel gearbeitet. Das setzt jedoch einen Modul, ein sich möglichst in ganzen Zahlen wiederholendes Grundmaß voraus. Wir haben bisher an der Alten Waage keinen Modul entdeckt. Im Gegenteil: die Gefachabstände an den Giebelseiten weichen von denen an den Längsseiten um etwa 2 cm ab. Da keine alten Baupläne vorhanden sind, – wenn es solche je gegeben hätte, wären sie während der Bauzeit verbraucht worden –, wissen wir aber nicht, wie dieser unbekannte Zimmermeister gearbeitet hat.

Bauzeit damals 2 bis 3 Jahre.

Bauzeit heute 2 bis 3 Jahre.

Heute brauchen wir zur Rekonstruktion zwei Professoren, mehrere Baudirektoren, Doktoren, Diplomingenieure, Verwaltungsfachleute, Techniker, Zeichner, Zimmermeister, Poliere, auch einige Handwerker; außerdem Lichtpausen, Foto- und Vergrößerungstechnik, Telefon, Telefax, Schreibcomputer, Baukran, Gabelstapler, Lkw, Sägewerke, Holzhändler, Elektrosägen, -fräsen, -bohrer u. v. a. m.

### **Künstlerische Leistung**

Die Alte Waage galt als das künstlerisch bedeutendste freistehende Fachwerkhäus Norddeutschlands. Mit Recht! Das „Freistehen“ ist von der Nutzung her bedingt. Zum Be- und Entladen der Speicherböden mußte man von allen Seiten mit Fuhrwerken heranzufahren können. Das „Freistehen“ wurde aber auch künstlerisch ausgenutzt, einmal,

um den über 270 m lagen Straßenplatz zu gliedern, dann aber auch, um ein freiplastisches Haus mit unverkennbarer Silhouette zu schaffen.

Das Erd- und Galeriegeschoß wurde zusammengefaßt. Die Deckenbalken der Galerie stehen nicht über, sondern sind in die Stiele eingezapft. Die steile, schlanke Wirkung wurde durch die engeren Stielabstände an den Ecken gesteigert.

Die beiden Obergeschosse kragen jeweils etwa 40 cm aus. Dafür müssen, um die Schwellen in einer Höhe halten zu können, die Deckenbalken sogenannte Stichbalken erhalten.

Ganz wichtig sind die Ecken, dort wird aus der konstruktiven Notwendigkeit dichter Stielstellung mit den auskragenden Stichbalken und Knaggen eine an pflanzliche Entfaltung erinnernde Wirkung erzielt.

Sehr fein durchgearbeitet ist das steile Dach mit den auskragenden Giebeln, den kurzen sehr steilen Walmen, dem eleganten Schwung der Aufschieblinge, den drei weit auskragenden Dachlukern.

Die Schnitzereien sind noch gotisch zurückhaltend. Die Konstruktionsglieder, Stiele, Knaggen, Balkenköpfe, Schwellen, werden in ihrer Einzelbedeutung betont. (Das 1524 gebaute Hunebostelsche Haus, jetzt am Burgplatz, ist zwar älter, sein Ornament ist jedoch „moderner“, die Schnitzereien überziehen dort Schwellen, Stiele und Fußbänder).

Wichtig sind die Flachschnitzereien der Schwellen. Die dem Auge nahe Schwelle über dem Erdgeschoß zeigt verschlungene Seeungeheuer (Nixen, Drachen, Seepferde, Papageien). Kein Motiv wiederholt sich. Die Schwelle darüber ist schlichter, ein sich wiederholender gewundener Laubstab, darüber eine abstrahierte Astschwelle. Die Schwellen der Windelukern zeigen einen einfachen Kehlstab. Die Seeungeheuer der unteren Schwelle kann man so erklären:

Die Neustadt hatte Stapelrechte am Werder und trieb über Oker, Aller, Weser einen lebhaften Schiffshandel nach Bremen, sie verstand sich als Hafenstadt und führte einen Anker im Löwenwappen.

Mein Partner, Karl PARIS, – er hat auch die Hauptarbeit bei der Burg Dankwardenrode geleistet –, bearbeitet die Alte Waage. Er hat aus alten Fotos nach einem von ihm entwickelten Entzerrungsverfahren die Schnitzereien im Maßstab 1:1 gezeichnet. Drei im Städtischen Museum aufgefundene Balkenstücke halfen uns beim Festlegen der Schnitztiefe und Schnitztechnik.

Im Direktauftrag wurde mit Zustimmung des Vergabeausschusses im Rechnungsprüfungsamt der Schnitzer, der auch das Knochenhauer-Amtshaus gemacht hat, gewonnen.

### **Wie geht's weiter?**

Am 4. September 1992 ist Richtfest. Dann brauchen wir ein Jahr für den Ausbau. Die Gefache werden in Ziegelmosaik ausgemauert. Innen Wärmedämmung, Tritt- und Luftschallschutz in den Decken, nach außen schlagende historische Fenster, 3fach-Verglasung, alle sonstigen Einbauten neutral, modern; wir wollen dem mächtigen Fachwerk keine Konkurrenz durch Bräustüblromantik machen.

Am Ende des Jahrtausends wird noch einmal eingerüstet, die unvermeidbaren Holzrisse werden behandelt und die Fassade gestrichen.

Drei Wetterfahnen mit den Jahreszahlen 1534, 1944 und 1994 werden auf das Schicksal der Alten Waage hinweisen.

EKKEHARD WINTERFELDT, Hannover

## Sind Naturstoffe bessere Wirkstoffe?

Hannover, 25. Mai 1992\*

Naturstoffchemiker und Wirkstoffchemiker sehen teils mit Vergnügen, teils mit Verwunderung und teils mit Unbehagen und Sorge, welche unglaubliche Überbewertung Worte wie „natürlich“, „Naturprodukt“, „Naturstoff“, „naturidentisch“ usw. im schlichten Gemüt der Menschen des ausgehenden 20. Jahrhunderts auslösen. Jedwede Wunderwirkung und unerklärliche Zauberkraft wird bedenkenlos und kritiklos von einer Population akzeptiert, die gleichzeitig dem technisch-naturwissenschaftlichen Bereich mit viel Kritik und Skepsis gegenübersteht. Dieser Naturprodukte mystifizierende Wunderglaube, gepaart mit einer teilweise militanten Technikfeindlichkeit, löst beim nüchternen Naturwissenschaftler Erinnerungen an mittelalterliche Glaubenskriege aus und führt bei den Laien immerhin zu recht unglaublichen Vorstellungen, wie z. B. der, daß ein im Labor synthetisierter Naturstoff, selbst wenn er denn in allen Details der Konstitution und absoluten Konfiguration unbezweifelbare Identität mit seinem natürlichen Pendant zeigt, doch wohl auf gar keinen Fall mit einer Verbindung, die in einer Pflanze oder einem Tier synthetisiert wurde, identisch sein könne. Hier findet dann die sachliche, an Fakten orientierte wissenschaftliche Diskussion ihr jähes Ende, und sie kann bestenfalls noch von Theologen oder Philosophen weitergeführt werden, obwohl auch diese von der Voraussetzung ausgehen müssen, daß die in grauer Vorzeit so hochstilisierte und für wundersam leistungsfähig gehaltene „vis vitae“ spätestens seit 150 Jahren von **Friedrich Wöhler** vom Sockel gestoßen und als Aberglaube entlarvt wurde, als er 1828 mit den Worten: „Ich muß Ihnen sagen, daß ich Harnstoff machen kann, ohne dazu Nieren oder überhaupt ein Thier, sey es Mensch oder Hund, nöthig zu haben“, die geglückte Synthese des Harnstoffes mitteilte – einer Verbindung, die eindeutig biologischer Herkunft ist und hier jetzt zum ersten Mal als Resultat eines Labor-experiments das Tageslicht erblickte. Tausende von Beispielen sind inzwischen gefolgt, wobei dann inzwischen erheblich komplexere Strukturen erstellt und um Größenordnungen gesteigerte biologische Aktivitäten erzielt wurden. Die Perfektionierung der synthetischen Kunst, zu deren rascher Entwicklung natürlich auch höchst informative spektroskopische Techniken (Infrarotspektroskopie, Kernresonanzmessungen, Massenspektroskopie) sowie hocheffiziente Trennmethoden beigetragen haben, gestattete nun nicht nur die Herstellung der biologisch aktiven Verbindungen aus der Natur, sondern auch deren gezielte und sehr selektive chemische Transformation zu Konstitutions- und Konfigurationsvariationen, wie sie aus den natürlichen Quellen nicht zur Verfügung stehen. Mehr noch – es gelang, inspiriert und motiviert durch die vom Naturstoff gelegte Fährte, ähnliche, charakteristische Struktureinheiten aufweisende Nach-

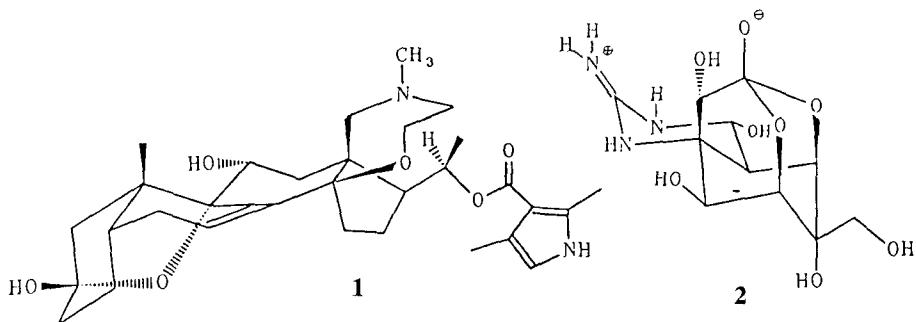
---

\* Vortrag vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (Zusammenfassung)

ahmungen des Naturstoffs zu präparieren, die sich dann häufig ebenfalls als hochwirksam erwiesen, ja bisweilen sogar dem Naturstoff deutlich überlegen waren. Wenn schon nicht immer in ihrer biologischen Wirkung, so doch dann in ihrer Verträglichkeit, durch schwächer ausgeprägte Nebenwirkungen sowie bessere biologische Verfügbarkeit bzw. der Quantität oder der Qualität der Metaboliten. Ähnliche Erfahrungen machte man auch mit den oben erwähnten Strukturvarianten, die aus den Nährstoffen selbst durch wohlgeplante chemische Veränderungen zugänglich wurden.

Es gibt somit nach vielen Jahren einer systematischen und wirkungs- bzw. verträglichkeitsorientierten chemischen Modifizierung von biologisch aktiven Naturstoffen überhaupt keinen Zweifel mehr an der z. T. ungewöhnlich hohen Überlegenheit der rein synthetischen Strukturvarianten gegenüber dem Original natürlicher Herkunft.

Fragt man nach Gründen für diesen Tatbestand, so ist die Antwort gleichermaßen plausibel wie naheliegend. Zweifellos wäre es schon von Anfang an ein ganz ungewöhnlicher und unwahrscheinlicher Zufall, wenn eine Pflanze, ein Tier oder Mikroorganismus mit den zur Verfügung stehenden strukturell wie auch konfigurativen (– sterische Anordnung –) eng begrenzten Synthesebausteinen eine für die Humanindikation optimierte Substanz biosynthetisieren würde. Allenfalls haben die Inhaltsstoffe eines biologischen Systems im Zuge der Evolution bzw. bei der Durchsetzung am Standort einen Platzvorteil bedeutet, und daher muß der Versuch der Verknüpfung mit biologischer Aktivität am Menschen zunächst auf den Bereich der Toxizität beschränkt bleiben. Auf diesem Sektor hat die Natur dann auch in der Tat einige Höchstleistungen aufzuweisen. So stellen natürliche Neurotoxine wie Batrachotoxin **1** und Tetrodotoxin **2** (Schema I) mit einer  $LD_{50}$  von 2  $\gamma$  und 8  $\gamma/kg$  Maus wohletablierte Gifte wie Blausäure ( $LD_{50} = 1000 \gamma/kg$ ) und Strychnin ( $LD_{50} = 400 \gamma/kg$ ) weit in den Schatten. Die Fähigkeit, extrem toxische Verbindungen synthetisieren zu können, bietet gewiß einen recht sicheren Schutz gegen biologische Feinde und wurde daher in der Natur zu hoher Vollkommenheit entwickelt. Hier gerät man dann allerdings mit der Frage, ob Naturstoffe überhaupt mit irgendeinem definierten „Ziel“ bzw. nach Plan und mit „Absicht“ biosynthetisiert werden – Deutung, der viele eher mit Skepsis begegnen –, schon in den Bereich der Philosophie. Die exakten Naturwissenschaften jedenfalls liefern keine greifbaren Argumente für diese These, wobei es allerdings auf der anderen Seite keinen



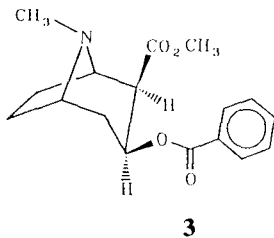
Schema I:  
Die natürlichen Neurotoxine Batrachotoxin **1** und Tetrodotoxin **2**



Zweifel gibt, daß die Bildung niedermolekularer Naturstoffe durch äußere Anlässe ausgelöst werden kann.

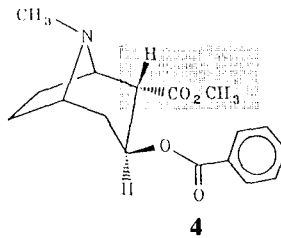
Es darf also sicher nicht überraschen, wenn optimierte Wirkstoffe erst durch die formende und mit der Struktur auch die Eigenschaften ändernde Hand des Chemikers geschaffen werden. Zur Illustration der Szene werden wir im Folgenden einige nach gusto ausgewählte Beispiele aus dem Bereich der biologisch aktiven Naturstoffe näher betrachten.

An den Anfang stelle ich das grundsätzlich bereits sehr lange für die lokale Anaesthetisierung zur Verfügung stehende Alkaloid Cocain. Die zu Recht gefürchteten Nebenwirkungen dieser Verbindung sind indessen wohlbekannt und begründen inzwischen den traurigen Ruhm dieser Droge. Zusätzlich ist jedoch noch zu registrieren, daß die Lösungen dieser Verbindung eine recht unbefriedigende Beständigkeit zeigen, so daß bei der Sterilisierung von Ampullen Schwierigkeiten auftraten. Kein Wunder also, wenn hier synthetische Modifikationen ohne störende Nebenerscheinungen angestrebt wurden, und mit den Syntheseprodukten Dextrocain und Novocain (Schema II) konnte dieses Ziel in der Tat erreicht werden. Die konstitutionellen Analogien sind indessen bei geeigneter Schreibweise selbst beim Novocain noch evident, und der in Strukturformeln denkende Chemiker erkennt sofort, welches natürliche Molekül hier Pate gestanden hat.



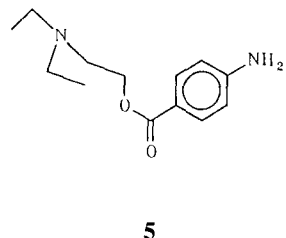
**Cocain**

Toxizität!  
Geringe Stabilität in Lösung!  
Mißbrauchpotential!  
Psychotrope Nebenwirkungen:  
Euphorie, subjektives Gefühl  
gesteigerter Leistungsfähigkeit,  
psychische Abhängigkeit ohne  
Toleranzentwicklung



**Dextrocain**

Geringere Toxizität!  
10-fache Wirkung!  
Keine psychotropen Nebenwirkungen!



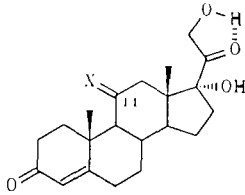
**Procain Novocain**

Geringe Toxizität!  
Gute Verträglichkeit!  
Keine psychotropen Nebenwirkungen!  
Stabilität der Lösungen  
(Sterilisation!)

*Schema II:*  
*Natürliche (3) und synthetische (4,5) Lokalanästhetika*

Ähnlich liegen die Dinge bei den Glucocorticoiden (Schema III), von denen aus dem Naturstoffangebot vor allem Cortison und Hydrocortison als Entzündungshemmer und Immunsuppressiva Bedeutung erlangt haben. Da hier ebenfalls diverse unerfreuliche Nebenwirkungen unübersehbar sind, mußte die Abtrennung dieser Effekte durch partialsynthetische Modifikation erreicht werden. Die beiden fluorierten Vertreter Fluorcortolon und Dexametason, die eine zusätzliche Doppelbindung sowie eine

Methylgruppe tragen, erweisen sich als eindeutig überlegen, und an ihrem Beispiel lassen sich auch mit aller Vorsicht Leitlinien formulieren, die den Chemiker an sein Ziel führen. So übt das im Raumanpruch mit dem Wasserstoffatom vergleichbare Fluoratom einen deutlichen elektronischen Effekt aus, der z.B. zur Erhöhung der Azidität der essentiellen OH-Gruppe am C-Atom-11 beitragen kann. Außerdem fixiert die zusätzliche Doppelbindung die Konformation des Moleküls – beides Eigenschaften, die im Zuge der Wirkstoff-Rezeptor-Interaktion einen wichtigen Beitrag leisten können.



6

X = O: Cortison

X = H, OH: Hydrocortison

Nebenwirkungen:

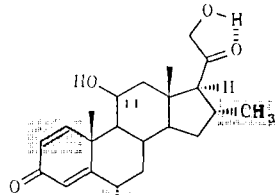
Förderung der Gluconeo-Genese  
(Steroid Diabetes)

Mobilisierung von Fetten

(Stammfettsucht), Natrium-

Retention – Kalium-Ausscheidung

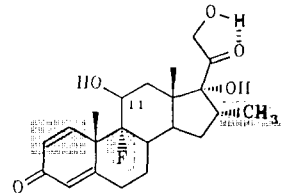
(Mineral-Corticoider Effekt)



7

Fluorocortolon

5-fache Wirkung

Kein Mineral-Corticoider  
Effekt

8

Dexamethason

29-fache Wirkung

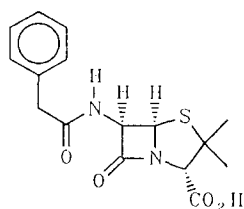
Reduktion der Neben-  
wirkungen

#### Schema III:

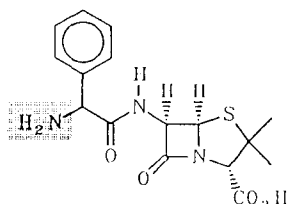
Natürliche (6) und synthetische (7,8) Glucocorticoide

Dieses ist einer der Gründe, warum die moderne, effiziente Wirkstoffe planende Pharmaforschung derzeit ausgiebig die Techniken der Computersimulation von Molekül-Substrat-Interaktionen betreibt, um am Bildschirm die optimale Molekülgestalt zu ermitteln. Besonders spektakulär sind die Erfolge bei den  $\beta$ -Lactam-Antibiotika vom Typ des Penicillins, deren ärgste Achillesferse ihre Instabilität im sauren Medium sowie ihre Anfälligkeit gegen die sogenannte Penicillinase (oder  $\beta$ -Lactamase) ist – ein Enzym, mit dem sich Bakterien bewaffnen können, um damit den für die Wirkung unverzichtbaren 4-Ring aufzuschneiden und dem Antibiotikum auf diese Weise das Kreuz zu brechen. Die beiden semisynthetischen Vertreter Ampicillin und Cephalotin (Cephalosporinderivat) zeigen sich deutlich überlegen (Schema IV), und beim Cefotaxim 12 erkennt man sehr eindrucksvoll, wie erst die Verschmelzung einer synthetischen „westlichen“ Hälfte mit einer aus der Natur entliehenen „östlichen“ Hälfte dem Antibiotikum wirklichen Glanz verleiht. Eine von der Natur geschenkte Struktur wird so durch die einfallsreich gestaltende organische Synthese für therapeutische Aufgaben optimiert.

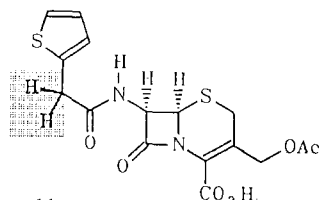
Schließlich, um auch noch den Aspekt der Bioverfügbarkeit ins Spiel zu bringen: die Tetracyclin-Antibiotika. Diese Substanzen zeigen alle ein bemerkenswertes Wirkungsspektrum und eine gute Wirkungsintensität. Der Pferdefuß liegt hier eindeutig

**9****Penicillin G**

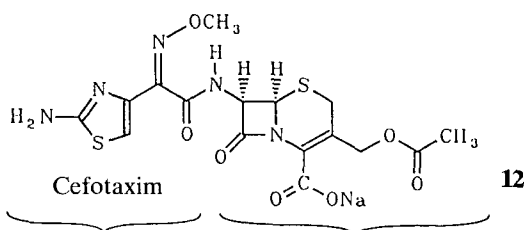
Säurelabil!  
Unwirksam durch  
Penicillinase

**10****Ampicillin**

Säurestabil!  
Penicillinase-  
Breitspektrum!

**11****Cephalotin**

Säurestabil!  
Stabil gegen Staphylokokken-  
Penicillinase!

**Cefotaxime****12**

„Synthetische“  
Komponente

„Natürliche“ Komponente  
aus Cephalosporin

3. Generation, Breitband  
Hohe  $\beta$ -Lactamase-Stabilität  
Ausgezeichnete Penetrationsfähigkeit  
Hohe Serumbindung, hohe Blut- und Gewebekonzentration

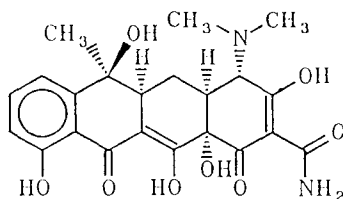
*Schema IV:*

*Natürliche (9) und synthetische (10,11,12) Antibiotika des  $\beta$ -Lactam-Typs*

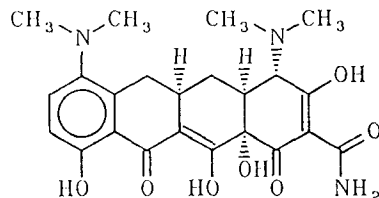
bei den pharmakokinetischen Daten (Schema V). So werden diese Moleküle im allgemeinen nur unvollständig resorbiert und haben nur eine eng begrenzte Serumhalbwertszeit. Auch hier stellt das halbsynthetische Minocyclin **14**, das über mehrere Synthesestufen aus Tetracyclin **13** erhalten werden kann, seinen Naturstoffvorläufer deutlich in den Schatten.

Eine Fortsetzung dieser Serie von Beispielen wäre ohne Schwierigkeiten möglich, das Resultat indessen wäre immer wieder das gleiche: Schwere, die Anwendung stark einschränkende Defizite beim Naturstoff bis hin zu fataler Toxizität-Wirkungsoptimierung mit erhöhter chemischer Stabilität unter gleichzeitiger Minimierung von Nebenwirkungen bei den synthetischen Strukturanaloga. Kein Grund also für eine besondere Glorifizierung der Naturstoffe, dennoch aber viel Anlaß, neuen und strukturell interessanten Naturstoffen nachzuspüren, da sie häufig durch ihre biologische Aktivität vielversprechende Fährten zu pharmazeutisch wertvollen Substanzen legen.

Aber auch zur Frage Biotechnologie versus Syntheschemie zwingen die hier dargelegten Fakten zu einem ganz klaren Fazit, einen Ersatz des einen durch den anderen

**13****Tetracyclin**

Resorption 80%

Serumhalbwertszeit: 8–9<sup>h</sup>**14****Minocyclin**

Resorption &gt; 90%

Serumhalbwertszeit: 13<sup>h</sup>*Schema V:**Natürliche (13) und synthetische (14) Tetracyclin-Antibiotika*

wird es nicht geben. Es ist unredlich und unrealistisch, die biologische Chemie als den „sanften“ Nachfolger der klassischen Chemie anzupreisen. Die biologischen Systeme, seien es nun Enzyme, Mikrobakterien oder Zellkulturen, können wegen ihrer Spezifität auch wieder nur die originären Naturstoffe mit all ihren oben beschriebenen Mängeln und Defiziten hervorbringen. Das ist sicher kein geringer Beitrag, es werden auf diese Weise immerhin die natürlichen Strukturen, also die Ausgangsmaterialien, geliefert, aus denen dann mit Hilfe des Computerreißbretts und der chemischen Hochglanzbearbeitung unbehauene Rohlinge in wirkungsoptimierte Hochleistungssubstanzen maximaler Verträglichkeit übergeführt werden. Viele gute Gründe also, die synthetische Methodik unermüdlich zu verfeinern und vor allem die Selektivität zu verbessern, denn die ersten und häufig bereits die Richtungweisenden strukturellen und konfigurativen Manipulationen werden in aller Regel am zur Verfügung stehenden Naturstoff selbst vorgenommen – eine Beschäftigung, die wegen der Komplexität der Studienobjekte nicht des groben Vorschlaghammers, sondern eher der feinen Pinzetten und der Miniaturfeilen des chemischen Feinmechanikers bedarf.

KURT LESCHONSKI, Clausthal

## **Möglichkeiten zur Klassierung von Partikeln im Größenbereich um und unter $1\text{ }\mu\text{m}$**

Clausthal, 11. Juli 1993\*

### **1. Einleitung**

Die Herstellung pulverförmiger Produkte, mit oberen Partikelgrößen von etwa  $1\text{ }\mu\text{m}$  oder darunter, gehört zu einer der schwierigsten Aufgaben der Mechanischen Verfahrenstechnik. In diesem Größenbereich müssen fast alle für die Herstellung erforderliche Verfahren, wie z.B. die Zerkleinerung und die Klassierung der Partikel, ihre Abscheidung aus den Trägermedien und selbst deren Messung, in der Nähe oder an der Grenze ihrer physikalischen Möglichkeiten eingesetzt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die für die genannten Verfahren gültigen physikalischen Gesetze vielfach eine untere Anwendungsgrenze von angenähert  $1\text{ }\mu\text{m}$  aufweisen.

Die bei der Klassierung in gasförmigen oder flüssigen Medien auftretenden Probleme sind vor allem dadurch bedingt, daß das Gewicht der Partikel gegenüber anderen Kräften vernachlässigbar wird und vielfach die mehr zufällige Bewegung, verursacht durch Brown'sche Molekularbewegung, Diffusion und Strömungsturbulenz, dominiert. Da kleine Partikel vor allem den Strömungskräften folgen, wird es außerdem mit abnehmender Partikelgröße zunehmend schwieriger, die Partikel auf Bahnkurven zu bewegen, die von den Stromlinien der Strömung abweichen. Bei Partikelgrößen um und unter  $1\text{ }\mu\text{m}$  spielen darüberhinaus die zwischen den Partikeln und die zwischen Partikeln und Wänden auftretenden Haftkräfte eine immer größere Rolle. Dies bedeutet beispielsweise, daß sowohl die Dispergierung von aus feinen Partikeln zusammengesetzten Agglomeraten im Trägermedium sowie die Aufrechterhaltung dieses dispergierten Zustandes zum Hauptproblem einer Klassierung werden können. Im Gegensatz zu anderen Verfahren, wie z.B. der Abscheidung von Partikeln, müssen bei der Klassierung Partikelagglomerate vor der Trennzone, in der die Klassierung stattfinden soll, soweit aufgelöst werden, daß ihre größten Abmessungen allenfalls gleich, besser aber kleiner als die angestrebte Trenngrenze sind. Da  $1\text{ }\mu\text{m}$  Partikel mit einer Kraft aneinander haften, die etwa  $10^6$  mal höher ist als ihr Eigengewicht, läßt sich vorstellen, daß die Dispergierung von Agglomeraten schwierig und energetisch aufwendig sein wird.

Die Bewegung einer Partikel in einer Strömung läßt sich durch eine Bahnkurve beschreiben. Es läßt sich zeigen, daß der Verlauf dieser Bahnkurve, d.h. die Bewegung der Partikel in der vorgegebenen Strömung, durch die stationäre Sinkgeschwindigkeit,  $w_g$ , der Partikel im Schwerfeld bei ruhendem Medium, beschrieben wird.

---

\* Vortrag vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

Diese Sinkgeschwindigkeit wird, bei der Bewegung von Partikeln in ruhender Luft und bei Vernachlässigung des Auftriebs, aus dem Gleichgewicht zwischen Schwerkraft und Widerstandskraft berechnet. Man erhält für laminare Partikelumströmung Gl. 1:

$$w_g = \frac{\rho_p g x^2}{18 \eta} \quad \text{Re} < 0.25. \quad (1)$$

Danach besitzt z. B. eine Quarzkugel von 1  $\mu\text{m}$  Durchmesser in ruhender Luft eine stationäre Sinkgeschwindigkeit von 80  $\mu\text{m/s}$ . Eine Partikel dieser Größe legt eine Strecke von einem Zentimeter in 125 Sekunden zurück, und sie wird andererseits in einer mit 80  $\mu\text{m/s}$  aufsteigenden Luftströmung in der Schwebe gehalten. Da sich die Sinkgeschwindigkeit mit dem Quadrat der Partikelgröße ändert, bewirkt eine Reduzierung der Partikelgröße auf ein Zehntel eine Verringerung der Sinkgeschwindigkeit auf ein Hundertstel des genannten Wertes. Man erkennt, daß offenbar das Schwerefeld für Klassierungen im angestrebten Größenbereich ausscheidet.

In diesem Beitrag soll am Beispiel der Fliehkraft-Gegenstrom-Windsichtung und der Fliehkraft-Querstrom-Windsichtung aufgezeigt werden, daß es möglich sein sollte, den angestrebten Partikelgrößenbereich zu erreichen. Die Produktion von Größenverteilungen ist jedoch unterhalb etwa 1  $\mu\text{m}$  und bei nicht vernachlässigbaren Massendurchsätzen nicht trivial.

## 2. Die Gegenstrom-Windsichtung

### 2.1 Schwerkraft-Gegenstrom-Windsichter

Abb. 1 zeigt das Prinzip eines Schwerkraft-Gegenstromsichters. Er besteht aus einem vertikalen Rohr von kreiszylindrischem oder rechteckigem Querschnitt, das von unten nach oben von Luft durchströmt wird. Nimmt man an, daß die Strömungsgeschwindigkeit beim Eintritt in das Rohr über dem Rohrquerschnitt konstant ist, so wird sich über der Rohrlänge, in Abhängigkeit von der gewählten *Reynolds*-Zahl, ent-

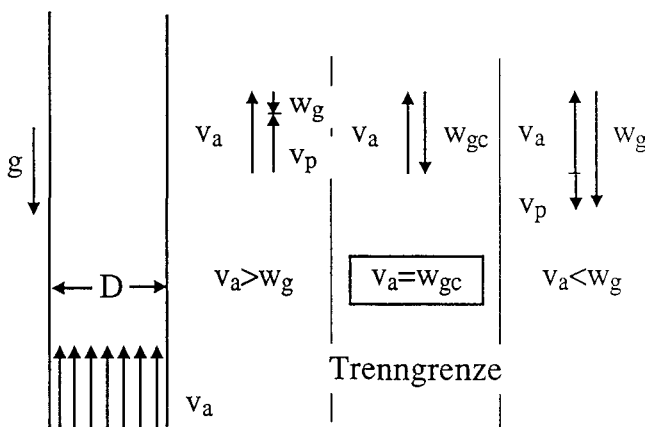


Abb. 1:  
Prinzip eines Schwerkraft-Gegenstrom-Windsichters

weder ein laminares oder turbulentes Strömungsprofil einstellen [1]. Führt man die zu klassierenden Partikel am unteren Rohrende mit der Strömung zu, so bestimmt die dort herrschende Strömungsgeschwindigkeit,  $v_a$ , die Trennung. Man unterscheidet drei Möglichkeiten:

- a) die Sinkgeschwindigkeit,  $w_g$ , ist kleiner als die Strömungsgeschwindigkeit,  $v_a$ : die Partikel werden mit der Differenzgeschwindigkeit:  $v_a - w_g = v_p$ , nach oben ausgetragen,
- b) die Sinkgeschwindigkeit,  $w_g$ , ist größer als die Strömungsgeschwindigkeit,  $v_a$ : die Partikel sedimentieren mit der Differenzgeschwindigkeit:  $w_g - v_a = v_p$ , nach unten, und
- c) die Sinkgeschwindigkeit,  $w_g$ , ist gleich der Strömungsgeschwindigkeit,  $v_a$ : die Partikel verbleiben im Eintrittsquerschnitt.  
 $v_p = 0$ . Sie werden statistisch auf das Fein- und Grobgut verteilt.

Die Trenngrenze dieser Klassierung wird mit Gl. 2 berechnet.

$$\bar{v}_a = w_{gc} = \frac{\rho_p g x_c^2}{18 \eta} \quad (2)$$

Da kleine Trenngrenzen kleinen Strömungsgeschwindigkeiten entsprechen, weisen derartige Windsichter bei absatzweisem Betrieb sehr lange Versuchszeiten auf, und sie hätten bei kleinen Luftgeschwindigkeiten nur sehr geringe Massendurchsätze. Die Anwendung ist deshalb auf gröbere Trenngrenzen im 100  $\mu\text{m}$ -Bereich und darüber beschränkt.

## 2.2 Fliehkraft-Gegenstrom-Windsichter

### 2.2.1 Prinzip und Möglichkeiten

Die Anwendung des Gegenstromprinzips auf kleinere Trenngrenzen ist jedoch möglich, wenn man die Trennung in einem Fliehkraftfeld durchführt. Der prinzipielle Aufbau eines derartigen Fliehkraft-Gegenstrom-Windsichters ist in Abb. 2 dargestellt [2].

Er besteht aus einer flachen, kreiszylindrischen Trennzone, die von außen nach innen von Luft durchströmt wird. Der einströmenden Luft wird z.B., wie dargestellt, durch unter einem Winkel angestellte Leitschaufeln ein Umfangsimpuls mitgeteilt. Man erhält eine Spiralströmung durch Überlagerung einer Drall- und einer Senkenströmung. Die zu klassierenden Partikel treten in die Trennzone in der Nähe des äußeren Umfangs ein. Partikel die kleiner sind als die sich einstellende Trenngrenze wandern mit der Sichtluft zum Zentrum der Trennzone und werden dort durch eine zentrale Öffnung abgeführt. Grobe Partikel wandern zum äußeren Umfang der Trennzone, wo sie durch unterschiedliche Maßnahmen, z.B. durch einen schmalen Umfangsschlitz, aus der Trennzone entfernt werden. Die Trenngrenze bewegt sich im radialen Kräftegleichgewicht auf einem Kreis vom Radius,  $r$ , angenähert mit der dort herrschenden Umfangskomponente der Strömung,  $v_\varphi$ .

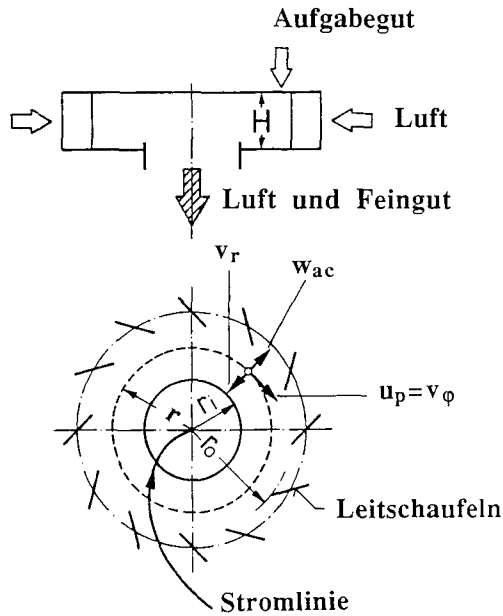


Abb. 2:  
Prinzip eines Fliehkraft-Gegenstrom-Windsichters

Aus dem radialen Kräftegleichgewicht läßt sich die Trenngrenze der Fliehkraft-Trennung berechnen. Man erhält:

$$w_{ac} = v_r = w_{gc} \frac{a}{g} = w_{gc} \frac{v_{\varphi}^2}{rg} \quad (3)$$

In Analogie zur Klassierung im Schwerfeld wird die Trenngrenze aus der Gleichheit von radialer Strömungsgeschwindigkeit und der Partikelsinkgeschwindigkeit im Fliehkraftfeld errechnet.

Man erkennt, daß sich die stationäre Sinkgeschwindigkeit im Schwerfeld um das Verhältnis von Zentrifugalbeschleunigung,  $a$ , zu Erdbeschleunigung,  $g$ , erhöhen läßt.

Nimmt man an, daß für die Trennung im Fliehkraftfeld eine radiale Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s einzustellen ist, so erhält man für eine 1  $\mu\text{m}$  Quarz-Kugel eine Beschleunigung von  $a = 12.500 \text{ g}$ . Bei einem Radius der Trennzone von  $r = 0,1 \text{ m}$  ist danach eine Umfangskomponente der Strömungsgeschwindigkeit von  $v_{\varphi} = 111 \text{ m/s}$  erforderlich. Reduziert man die Trenngrenze bei den gleichen Bedingungen auf 0,5  $\mu\text{m}$ , so reduziert sich  $w_{gc}$  auf 20  $\mu\text{m/s}$  und  $v_{\varphi}$  erhöht sich auf 222 m/s.

Das Verhältnis von  $v_r/v_{\varphi}$  am Radius,  $r$ , beschreibt die Steilheit der Strömungsspirale an diesem Ort, bzw. den Winkel, unter dem die Strömung in die Trennzone einströmen sollte. Er beträgt im Fall der Trennung bei 0,5  $\mu\text{m}$  0,29 Grad. Die Zuströmung muß demnach praktisch tangential erfolgen, was mit den schematisch dargestellten Leitschaufeln nicht ohne Probleme zu verwirklichen ist.



Kleinere Trenngrenzen lassen sich auch durch Verringerung der radialen Strömungskomponente,  $v_r$ , gegenüber dem bisher angenommenen Wert von 1 m/s, erzielen. Dies ist immer dann möglich, wenn die Massendurchsätze durch die Trennzone gering sein dürfen, wie dies beispielsweise bei Analysengeräten der Fall ist. Für technische Anwendungen versucht man die Gasströmung so stark wie nur irgend möglich mit Partikeln zu belasten, ohne nennenswerte Einbußen an der Qualität der Trennung in Kauf nehmen zu müssen.

Führt man Gl. 1 in Gl. 3 ein, und löst nach dem Produkt  $x_c v_\varphi$  auf, so erhält man Gl. 4:

$$x_c v_\varphi = \sqrt{\frac{18\eta}{\rho_p}} \sqrt{v_{r,r}} = \sqrt{\frac{18\eta}{\rho_p}} \frac{\dot{V}}{2\pi H} \quad (4)$$

Man erkennt aus dieser Gleichung, daß für einen Windsichter vorgegebener Größe und einen bestimmten Volumenstrom der Sichtluft das Produkt aus Trennkorngröße und Umfangsgeschwindigkeit konstant bleibt.

Für Kalkstein-Partikel ( $\rho_p = 2710 \text{ kg/m}^3$ ) berechnet man:

$$x_c v_\varphi = 3,467 \cdot 10^{-4} \sqrt{v_{r,r}} \quad (5)$$

In Abb. 3 ist Gl. 5 für  $v_{r,r} = 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$  und  $v_{r,r} = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}$  dargestellt. Der Bereich A gibt den unter den gewählten Randbedingungen möglichen Trenngrenzenbereich an. Man erkennt auch in dieser Darstellung, daß bei nicht vernachlässigbaren Massendurchsätzen zur Erzielung kleiner Trenngrenzen hohe Strömungs-Umfangsgeschwindigkeiten erforderlich sind.

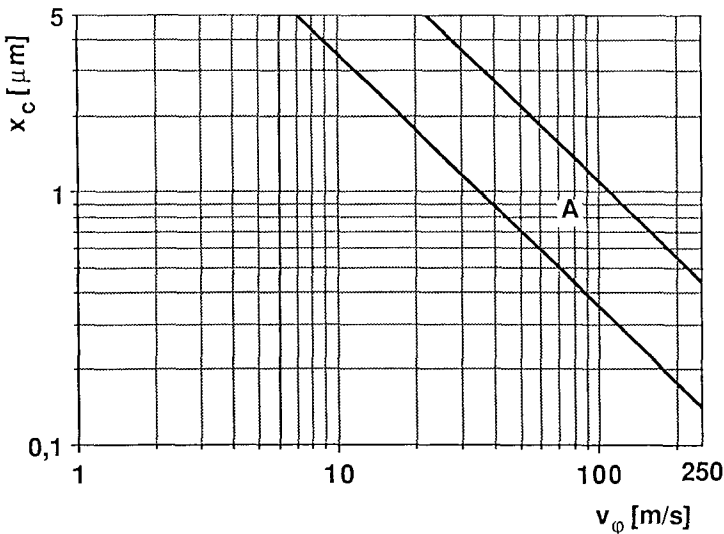


Abb. 3:  
Trenngrenze =  $f$  (Umfangsgeschwindigkeit), Gegenstrom-Fliehkraft-Windsichter

### 2.2.2 Die Cunningham-Korrektur, eine Möglichkeit zur Erzielung kleinerer Trenngrenzen

Will man die Trenngrenze bei der Bewegung von Partikeln in Gasen weiter verringern, so bleiben bei demselben Trennprinzip nur wenige Möglichkeiten. Eine Möglichkeit besteht darin, den Druck in der Trennzone unter den Normaldruck abzusenken.

Wird nämlich die Größe der Partikel klein im Verhältnis zur mittleren freien Weglänge der Gasmoleküle, so wird die Diskontinuität der Gasströmung einen Einfluß auf die Partikelbewegung haben. Dieser Effekt wird durch die sogenannte *Cunningham-Korrektur*,  $C_u$ , nach *E. Cunningham* [4] erfaßt, der 1910 darüber berichtete. Die *Cunningham-Korrektur* ist als das Verhältnis der tatsächlichen stationären Sinkgeschwindigkeit, zu der nach Gl. 1 berechneten, definiert. Sie läßt sich nach der von M. Knudsen und S. Weber [5] im Jahre 1911 vorgeschlagenen, in der 1945 von C.N. Davies [6] korrigierten Form berechnen (Gl. 6):

$$C_u = 1 + \frac{2\bar{\lambda}}{x} \left( 1,257 + 0,4 \exp \left( -\frac{0,55x}{\bar{\lambda}} \right) \right) \quad (6)$$

Die mittlere freie Weglänge kann anhand von Gl. 7 ermittelt werden:

$$\bar{\lambda} = \frac{kT}{\pi\sqrt{2}d_m^2p} \quad (7)$$

Darin stellt  $k = 1,3804 \cdot 10^{-23} \text{ Nm/K}$  die *Boltzmann-Konstante*,  $d_m$  den Moleküldurchmesser und  $p$  den Gasdruck dar. Für Luft erhält man die Zahlenwertgleichung:

$$\bar{\lambda}/\mu\text{m} = 22,7 \frac{T/\text{K}}{p/\text{Pa}} \quad (8)$$

Bei 20 °C und 1 bar ist die mittlere freie Weglänge gleich 0,0665  $\mu\text{m}$ .

Führt man Gl. 8 in Gl. 6 ein, so erhält man die Zahlenwertgleichung 9 für  $C_u$ , die in Abb. 4 dargestellt ist.

$$C_u = 1 + \frac{45,4T}{xp} \left( 1,257 + 0,4 \exp \left( -0,02423 \frac{xp}{T} \right) \right) \quad (9)$$

In diese Gleichung sind  $T$  in K,  $p$  in Pa und  $x$  in  $\mu\text{m}$  einzusetzen. Man erkennt aus Abb. 4, daß die *Cunningham-Korrektur* bei  $xp = 10^5 \mu\text{mPa}$  die stationäre Sinkgeschwindigkeit nach Gl. 1 um ca. 17% übersteigt und bei  $xp = 10^3 \mu\text{mPa}$  den 22,6-fachen Wert erreicht. Bei Absenkung des Druckes auf 0,1 bar, d.h. auf  $xp = 10^4 \mu\text{mPa}$  beträgt die *Cunningham-Korrektur*  $C_u = 2,9$ . Bei 0,1 bar und 0,1  $\mu\text{m}$  Partikelgröße würde die *Cunningham-Korrektur* auf den bereits genannten Wert von  $C_u = 22,62$  ansteigen. Die Zahlenwerte bleiben gegenüber den im Fliehkraftfeld erreichbaren Beschleunigungsziffern  $a/g$  bescheiden.

In Abb. 5 ist die Abnahme der Trenngrenze in Abhängigkeit von  $p$  und  $v_r$  bzw.  $v_\varphi$  dargestellt. Die eingezeichneten Punkte und die gestrichelt eingezeichnete Kurve geben Meßergebnisse wieder, die von *Y. Yamada*, *S. Doi* und *K. Iinoya* [7] mitgeteilt wurden. Man erkennt, daß erst eine Absenkung des Druckes auf Werte unter 0,2 bis 0,3 bar eine

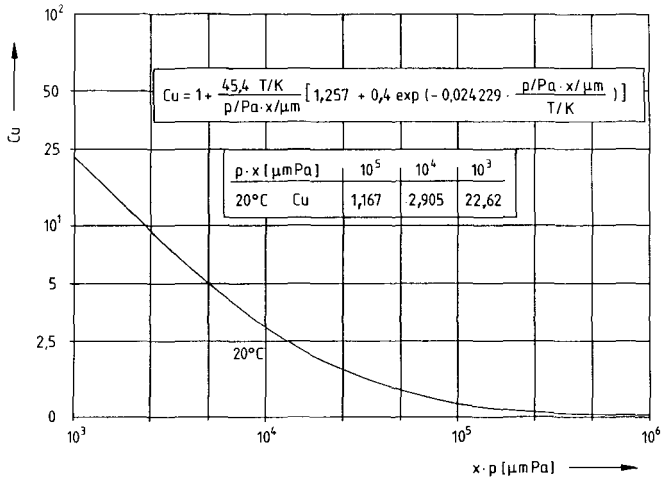


Abb. 4:  
Cunningham-Korrektur in Abhängigkeit von  $x\rho$  in  $\mu\text{mPa}$

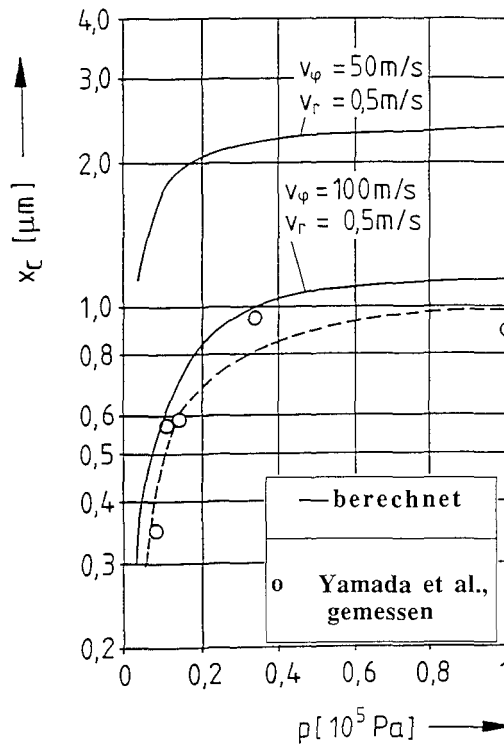


Abb. 5:  
 $x_c = f(p, v_r, v_\phi)$

merkliche Reduzierung der Trenngrenze ergibt. Da der gesamte Windsichter in einer Unterdruckkammer betrieben werden muß, ist der Aufwand beträchtlich.

Die Cunningham-Korrektur ist nicht auf eine Anwendung in Fliehkraft-Gegenstrom-Windsichtern beschränkt. Sie tritt bei allen Windsichtern auch unter Normalbedingungen auf, wenn die Partikelgröße unter etwa  $1\text{ }\mu\text{m}$  absinkt. In Abb. 6 ist der Einfluß der Cunningham-Korrektur für den Fall der Fliehkraft-Gegenstrom-Windsichtung dargestellt. Die jeweils unteren Kurven zeigen die Abweichung zu Gl. 5. Die auf die Cunningham-Korrektur zurückzuführenden Abweichungen sind gut zu erkennen. Sie sind bei der realen Auslegung von Windsichtern dieses Typs zu berücksichtigen.

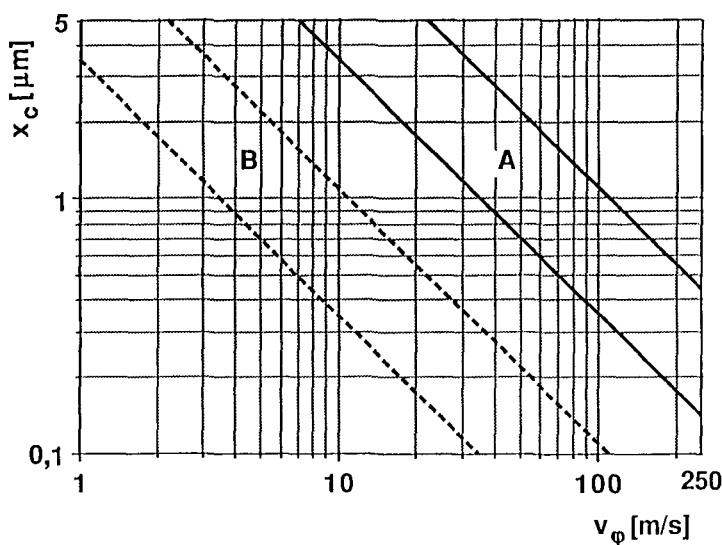


Abb. 6:  
Trenngrenze =  $f$  (Umfangsgeschwindigkeit),  
Gegenstrom-Fliehkraft-Windsichter, Cunningham-Einfluß

Die bisher beschriebenen Fliehkraft-Gegenstrom-Windsichter besitzen in der Trennzone keine rotierenden Teile. Die Einstellung und Beibehaltung der Strömungsbedingungen wird daher in starkem Maße durch Grenzschichteffekte und den Impulsaustausch zwischen Strömung und Feststoffpartikeln bestimmt. Erfahrungsgemäß ist es mit diesen Windsichtern auch kaum möglich, in den Trenngrenzenbereich unterhalb von  $1\text{ }\mu\text{m}$  vorzudringen, da hohe Umfangsgeschwindigkeiten sehr schnell wieder abgebaut werden. Die Trenngrenzen dieser Windsichter hängen außerdem in starkem Maße von den Feststoffmassendurchsätzen und den Größenverteilungen des Aufgabegutes ab. Man hat deshalb nach Möglichkeiten gesucht, einerseits die Strömung zu stabilisieren und andererseits bestimmte Umfangsgeschwindigkeiten einstellen zu können.

### 2.2.3 Gegenstrom-Windsichter mit beschaukelten Rotoren

Eine Antwort auf diese Probleme können mit Schaufeln versehene Rotoren bilden, die, wie in Abb. 7 schematisch dargestellt, im Zentrum der bisher von Einbauten freien Trennzone angeordnet werden. Die Rotorschaufeln sind im allgemeinen radial angeordnete, unprofilierte Bleche, die in großer Zahl in der Nähe des Rotorausenumfangs angeordnet sind. Der Rotor wird von außen nach innen durchströmt, wobei, wie noch zu zeigen ist, die Spiralströmung im beschaukelten Bereich aus der Überlagerung einer Senkenströmung und eines Starrkörperwirbels bestehen sollte.

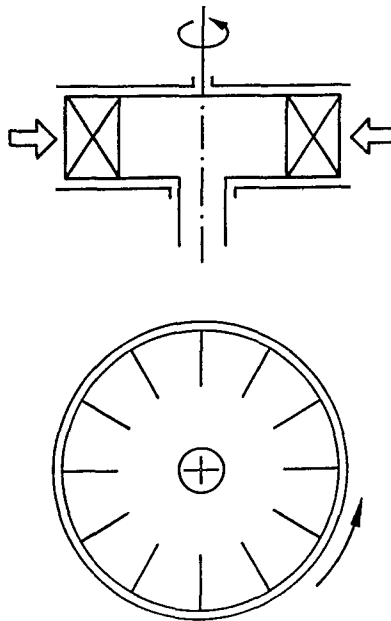


Abb. 7:  
Beschauelter Rotor

K. Legenhausen [8] hat die Strömungsverhältnisse in der Trennzone eines derartigen Windsichters untersucht. Für die Untersuchungen wurde ein von Wasser durchströmtes Modell verwendet, in dem die Fluidgeschwindigkeiten mittels Laser-Doppler-Anemometrie bestimmt wurden. Es zeigte sich, daß sich im Bereich der Schaufeln nur dann ein Starrkörperwirbel einstellen kann, wenn die Zuströmung zum Außenumfang des Rotors mit der Umfangsgeschwindigkeit des Rotors erfolgt.

Davon abweichende Zuströmgeschwindigkeiten ergaben, wie in Abb. 8 dargestellt, unerwünschte Wirbel zwischen den Schaufeln. Bei Gleichheit der beiden Umfangsgeschwindigkeiten, d.h. stoßfreiem Eintritt der Strömung in den beschaukelten Rotor, werden die Zwischenräume zwischen den Schaufeln gleichmäßig, gemäß  $v_r r = \text{konstant}$ , durchströmt. Die zwischen den Schaufeln auftretenden Wirbel müssen nicht not-

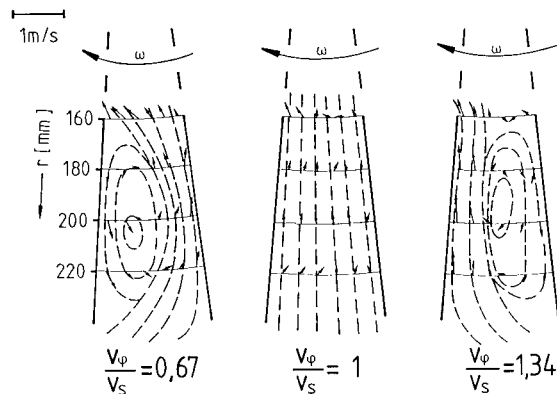


Abb. 8:  
Strömungsverhältnisse in beschauelten Rotoren [8]

wendigerweise die Trennbedingungen direkt verändern. Die unkontrollierte Ablösung von Wirbeln und der damit verbundene Transport von Feingut ins Grobgut sowie möglicher Schaufelverschleiß lassen jedoch eine wirbelfreie Durchströmung der Schaufelkanäle erstrebenswert erscheinen.

Darüberhinaus wurde aber auch festgestellt, daß sich im inneren, unbeschauelten Teil des Rotors, in Umfangsrichtung angenähert eine Potentialströmung einstellt.

Man nimmt im allgemeinen an, daß die Trenngrenze auch bei einem beschauelten Rotor durch die Strömungsverhältnisse am Außenumfang des Sichtrotors bestimmt wird. Diese Annahme läßt sich für die gemessenen Strömungsverhältnisse nachprüfen, wenn man in Gl. 4  $v_r(r)$  und  $v_\varphi(r)$  einführt.

Durch Einsetzen der Kontinuitätsgleichung:

$$v_r r = v_{r0} r_0 = \text{konstant} \quad (10)$$

und der Gleichung für einen Starrkörperwirbel:

$$v_\varphi r^{-1} = v_{\varphi 0} r_0^{-1} = \text{konstant} \quad (11)$$

erhält man:

$$x_c v_\varphi = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{18 \eta r_0^3 v_{r0}}{\rho_p}} \quad (12)$$

Danach ist die Trenngrenze,  $x_c$ , umgekehrt proportional zum Radius,  $r$ . Sie nimmt also in einem Starrkörperwirbel mit abnehmendem Radius zu.

Wie von *K. Legenhausen* gemessen wurde, liegt im nicht beschauelten inneren Bereich des Rotors in Umfangsrichtung eine freie Wirbelströmung, d.h. ein Potentialwirbel, vor. Dieser läßt sich durch Gl. 13 beschreiben:

$$v_\varphi r = v_{\varphi 0} r_0 = \text{konstant} \quad (13)$$

Man erhält folgende Gleichung für  $x_c(r)$ :

$$x_c v_\varphi = r \sqrt{\frac{18 \eta v_{r0}}{\rho_p r_0}} \quad (14)$$

bei einem Potentialwirbel nimmt die Trenngrenze linear mit dem Radius zu.

H. Rumpf und K. Leschonski [9] haben 1967 bei der Untersuchung eines Gegenstrom-Schwerkraft-Windsichters darauf hingewiesen, daß hohe Trennschärfen nur erreicht und ein Zurückhalten feiner Partikel in der Trennzone nur dann vermieden werden können, wenn die Trenngrenze in Richtung des Abtransports des Feingutes immer zunimmt. Größere theoretische Trenngrenzen haben deshalb im Einflußbereich des Starrkörperwirbels auf die Trennung selbst keinen Einfluß mehr, sie stellen nur sicher, daß das Feingut schneller aus der Trennzone entfernt wird.

In Abb. 9 ist der berechnete Verlauf der Trenngrenze über dem Radius dargestellt. Die Trenngrenze wächst danach in der beschauelten Zone nach innen an, um danach im unbeschauelten Bereich linear abzufallen.

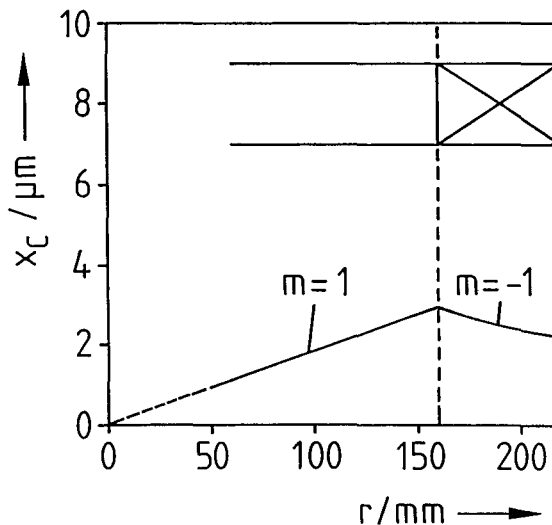


Abb. 9:  
Trenngrenze als Funktion vom Radius

Den Außenrand des Rotors können nur solche Partikel passieren, die kleiner sind als die angegebene Trenngrenze. Sie werden von der Senkenströmung auf kleinere Radien mitgenommen. Im dargestellten Fall des im Außenbereich beschauelten Rotors werden ein Teil dieser Partikel im unbeschauelten Innenbereich einen Radius finden, auf dem die dortige Trenngrenze ihrer Partikelgröße entspricht. Die Partikel verbleiben auf diesen Radien, und sie werden sich theoretisch dort anreichern. Ledig-

lich die feinsten Partikel, im dargestellten Fall mit Trenngrenzen, die dem Austrittsrohr-radius von 50 mm entsprechen, werden die Trennzone verlassen können.

Der dargestellte Sachverhalt zeigt, daß der unbeschauelte Rotorteil unbedingt zu vermeiden ist. Man erreicht dies dadurch, daß

- a) entweder die Rotorscheaufeln bis zum Radius des Austrittsrohres verlängert werden, oder
- b) die Absaugung des Feingutaerosols direkt hinter den inneren Schaufelenden erfolgt.

Die Vermeidung des Potentialwirbels im inneren Rotorbereich hat außerdem den Vorteil, daß der Strömungsdruckverlust des Rotors erheblich zurückgeht.

### 3. Das Querstromprinzip

#### 3.1 Das Grundprinzip

Das Grundprinzip einer Querstromanordnung ist in Abb. 10 für eine geradlinige Rohrströmung dargestellt. Ein beispielsweise rechteckförmiges Rohr wird dabei von links nach rechts von einem Fluid durchströmt. Der Einfachheit halber wurde angenommen, daß das Fluid im Eintrittsquerschnitt eine konstante Geschwindigkeit aufweist. Die Partikel werden quer zur Strömung durch unterschiedliche Kräfte,  $F_\alpha$ , bewegt. Technisch genutzt werden die Schwerkraft, die Zentrifugalkraft, elektrische Kräfte, magnetische Kräfte und die Diffusion. Im Fall der Schwer- und der Zentrifugalkraft sedimentieren die Partikel in der Strömung, und die Wanderungsgeschwindigkeiten  $w_{gc}$  und  $w_{ac}$  quer zur Strömung lassen sich, wie in den Gln. 1 und 3 angegeben, berechnen.

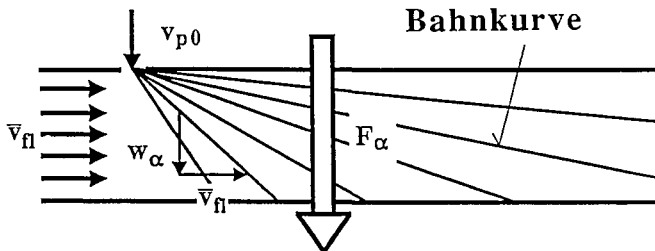


Abb. 10:  
Querstromtrennung, Prinzip

Wie in Abb. 10 dargestellt, bilden die Partikelbahnkurven einen Fächer, der an dem Punkt beginnt, an dem die Partikel durch die Kanalwand, z.B. durch einen engen Schlitz, in die Strömung gelangen. Für den Fall, daß die Partikel mit vernachlässigbarer Anfangsgeschwindigkeit,  $v_{p0}$ , in die Kanalströmung eintreten und in dieser laminar umströmt werden, erhält man geradlinige Bahnkurven. Der Partikelfächer läßt sich einerseits für eine Mehrfachklassierung, andererseits für Meßzwecke benutzen. Im letzteren Fall erhält man eine Spektrometeranordnung, bei der die Lage der Bahnkurven durch die stationäre Sinkgeschwindigkeit der Partikel bestimmt ist und die Konzentration einzelner Sinkgeschwindigkeitsklassen z.B. optisch ermittelt wird.



Eine Klassierung läßt sich erreichen, indem man den Boden des Kanals für die Partikel durchlässig macht und beispielsweise durch eine Reihe von Schneiden in nebeneinanderliegende Kanäle unterteilt, durch die einzelne Sinkgeschwindigkeitsklassen abgeführt werden.

### 3.2 Fliehkraft-Querstrom-Windsichter

Das Prinzip eines Fliehkraft-Querstrom-Windsichters ist in Abb. 11 dargestellt. Er besteht aus einer äußeren, kreisringförmigen Trennzone (1), die von links nach rechts durchströmt wird und mit der Winkelgeschwindigkeit,  $\omega$ , rotiert. Die Strömung wird durch mitrotierende Leitschaufeln, die vor der Trennzone (3) angebracht sind, und durch Wandreibung in Rotation versetzt. Die Partikel werden in einer Zusatzluftströmung dispergiert und mit der Umfangsgeschwindigkeit des Innenringes in den rotierenden Luftring (2) eingebracht. Neben der Dispergierung der Partikel im Luftstrom besteht das Hauptproblem darin, dieses Aufgabegutaerosol möglichst störungsfrei in die Trennzone, bzw. die Sichtluftströmung, einzubringen. Die Partikel sedimentieren in der Luftströmung radial nach außen, sie werden am Ende der Trennzone durch eine ringförmige Schneide (4) in grobe und feine Partikel getrennt. Ein Teil der groben Partikel wird sich auf der Innenseite der Außenwand der Trennzone absetzen. Diese müssen von Zeit zu Zeit aus der Trennzone entfernt werden, sofern nicht durch geeignete Wahl der Betriebsbedingungen eine Abscheidung an der Außenwand verhindert werden kann.

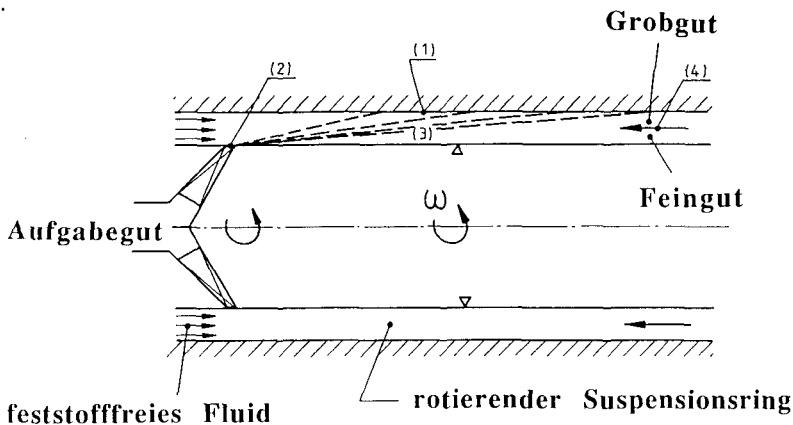


Abb. 11:  
Prinzip eines Fliehkraft-Querstrom-Windsichters

In einem Klassierer enthält die in die Sichtzone eintretende Luft keine Partikel. Die beiden aus der Trennzone von der Schneide abgeschälten Grob- und Feingutaerosole müssen in nachgeschalteten Abscheidern von der Luft getrennt werden.

Vom Aufbau her ähnliche Zentrifugen werden schon seit langem in der fest-flüssig-Trennung benutzt. Als Aerosol-Zentrifugen sind sie offenbar bisher nicht gebaut worden.

Die Trenngrenze legt im Sichter den radialen Weg,  $\Delta r = r - r_i$ , zwischen Innenradius und Schneide, auf der Länge der Trennzone,  $L$ , zurück. Man berechnet die Trenngrenze aus Gl. 15:

$$x_c v_\varphi = \sqrt{\frac{18 \eta}{\rho_p}} \sqrt{\frac{(r - r_i)}{L}} \sqrt{v_z r} \quad (15)$$

Die Trenngrenze verändert sich umgekehrt proportional zu  $v_\varphi$ . Kleine Trenngrenzen erfordern hohe Umfangsgeschwindigkeiten,  $v_\varphi$ , und kleine axiale Strömungsgeschwindigkeiten,  $v_z$ , sowie lange Trennzonen,  $L$ , und kleine radiale Abmessungen,  $\Delta r$  und  $r$ . Bei der fest-flüssig-Trennung wurde dieses Prinzip in der sogenannten Röhrenzentrifuge verwirklicht.

Mit einem am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Umweltverfahrenstechnik der TU Clausthal gebauten Windsichter, der für andere Verhältnisse konzipiert wurde, und dessen Abmessungen nicht den obigen Anforderungen entsprechen, wurden die in Abb. 12 dargestellten Summen-Verteilungskurven der Feingüter erreicht. Aus einem Kalkstein-Aufgabegut, das ca. 42% Massenanteile unterhalb  $1 \mu\text{m}$  enthielt, wurde bei einem Durchsatz von  $6 \text{ kg/h}$  ein Feingut mit ca. 87% unter  $1 \mu\text{m}$  erreicht. Der Medianwert dieses Produktes betrug ca.  $0,5 \mu\text{m}$ . Die Trenngrenze betrug ca.  $0,3 \mu\text{m}$ .

Mit den für diesen Windsichter gültigen geometrischen Daten ( $L = 0,6 \text{ m}$ ;  $r = 0,19 \text{ m}$  und  $\Delta r = 0,03 \text{ m}$ ) und  $v_r = 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$  bzw.  $v_r = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}$  erhält man die Zahlenwertgleichung 16.

$$x_c v_\varphi = 7,75 \cdot 10^{-5} \sqrt{v_z r} \quad (16)$$

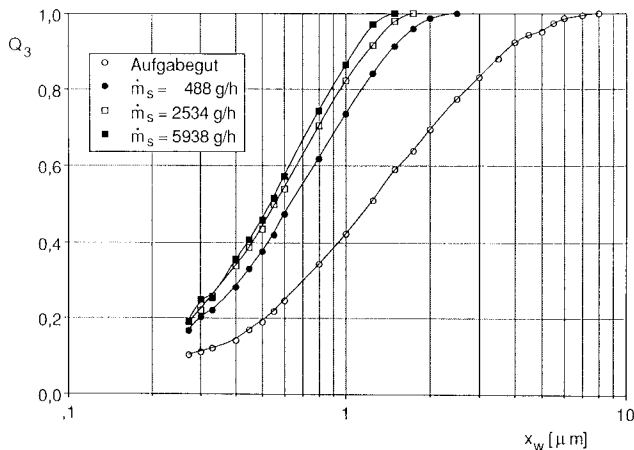


Abb. 12:  
Summen-Verteilungskurven

Eine Reduzierung von  $\Delta r$  auf  $0,01 \text{ m}$  und eine Verlängerung der Trennzone auf  $L = 1 \text{ m}$  verringert die Konstante in Gl. 16 auf die Hälfte. Man erhält dafür den in Abb. 13 eingezeichneten Bereich B.

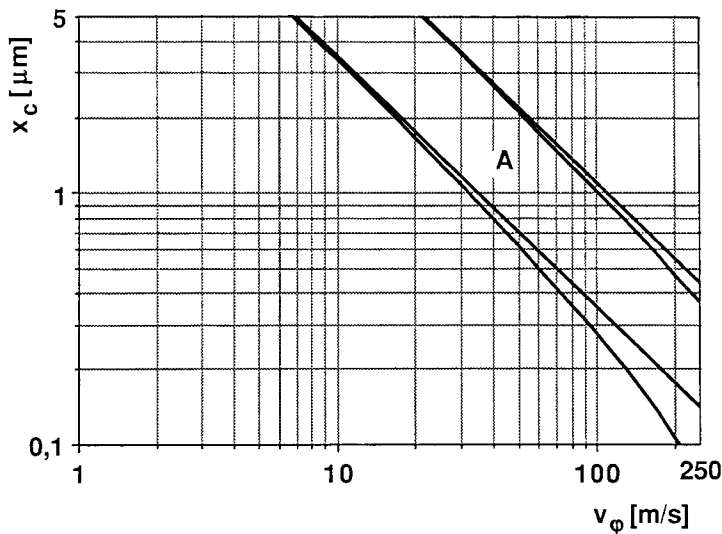


Abb. 13:  
Trenngrenze =  $f$  (Umfangsgeschwindigkeit),  
Fliehkraft-Querstromsichter

Ein Zentrifugal-Querstrom-Windsichter besitzt deshalb ein hohes Potential, vielleicht das beste, für kleine Trenngrenzen im angestrebten Größenbereich, sofern man die zu erwartenden Einschränkungen, wie beispielsweise voraussichtlich nicht erreichbare hohe Massendurchsätze und absatzweisen Betrieb akzeptieren kann. Dieser Bauart besitzt jedoch, im Verhältnis zu den Spiralwindsichtern mit beschauelten Rotoren, den energetischen Vorteil relativ geringer Rotorumfangsgeschwindigkeiten.

#### 4. Zusammenfassung

Am Beispiel der Gegenstrom- und der Querstrom-Windsichtung im Fliehkraftfeld wurden stark vereinfacht die Möglichkeiten zur Klassierung von Partikeln im Größenbereich um und unter 1  $\mu\text{m}$  dargestellt. Klassierungen in diesem Größenbereich sind prinzipiell mit beiden Sichtprinzipien möglich.

Gegenstrom-Windsichter benötigen für Trenngrenzen um etwa 1  $\mu\text{m}$  Umfangsgeschwindigkeiten von mehr als 100  $\text{m/s}$ , sofern Massendurchsätze oberhalb von etwa 100  $\text{kg/h}$  verwirklicht werden sollen. Bei noch kleineren Trenngrenzen sind Hochgeschwindigkeitsrotoren erforderlich, die bisher in der praktischen Anwendung fehlen. Der SFB 180 der TU Clausthal, „Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen bei besonderen mechanischen, thermischen und chemischen Belastungen“, beschäftigt sich seit einigen Jahren mit dieser Problematik.

Querstrom-Windsichter im Zentrifugalfeld lassen theoretisch Trenngrenzen unter 1  $\mu\text{m}$  bei sehr viel kleineren Umfangsgeschwindigkeiten zu. Sie lassen sich deshalb energetisch günstiger betreiben. Es läßt sich jedoch zeigen, daß mit Massendurchsätzen zu rechnen ist, die nur wenige  $\text{kg/h}$  betragen werden.

**Literaturnachweis**

- [1] K. Leschonski, H. Rumpf: Powder Technology 2 (1968/69) 1231–1241.
- [2] H. Rumpf: Dissertation, Univ. Karlsruhe, 1939.
- [3] K. Leschonski: Ullmann's Enzyklopädie, Verlag Chemie GmbH, Weinheim, Band II (1972) 35–42.
- [4] E. Cunningham: Proc. Roy. Soc. 8317 (1910) 357.
- [5] M. Knudsen, S. Weber: Ann. Physik 36 (1911) 981–994.
- [6] C. N. Davies: Proc. Phys. Soc. London 57 (1945) 259.
- [7] Y. Yamada: Powder and Bulk Solids (1987) 215–220.
- [8] K. Legenhausen: Dissertation, Techn. Univ. Clausthal, 1991.
- [9] H. Rumpf, K. Leschonski: Chem. Ing. Techn. 39 (1967) 1231–1241.

---

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Kurt Leschonski  
Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Umweltverfahrenstechnik,  
Technische Universität Clausthal · Leibnizstraße 19 · 3392 Clausthal-Zellerfeld

GREGOR MAURACH, Münster

## Zur Schlacht vom Teutoburger Wald

Braunschweig, 9. Oktober 1992\*

Man weiß nicht recht, ob die Schlacht am Teutoburger Wald, die „Hermanns-Schlacht“, auf ein Ruhmesblatt zu schreiben ist oder eher ein bedenkliches Unternehmen war. Gewiß, der Schlag war ungemein schlaue Vorbereitung und mit unerhörter Brutalität und Konsequenz zuende geführt worden; politisch aber hatte er nur die eine Folge, daß die Römer von nun an noch systematischer Germaniens Unterwerfung betrieben und die Deutschen in den Jahrzehnten vor und nach der Wende zum 20. Jahrhundert diese Schlacht zum Anlaß für einen verachtenswerten Chauvinismus nahmen und für ein paar scheußliche Denkmäler.

Doch lassen wir diese allgemeinen Betrachtungen und wenden wir uns der Frage zu, wie denn aus den antiken Berichten und modernen Forschungen und Grabungen Wissenschaft zu gewinnen wäre. Ich will diese Frage heute so beantworten, daß ich zunächst die historischen, aus antiken Quellen stammenden Fakten vorführe, dann die antiken Berichte selbst und zuletzt dann zeige, was man inzwischen an dem Schlachtort selbst gefunden hat. Das bedeutet: inwieweit der Grabungsbefund die antiken Berichte stützt oder widerlegt.

### Die antike Bezeugung

Im Jahre 9 nach Chr. wurde nach mehreren Jahren verlustreicher Kämpfe der Aufstand der Pannonier und Dalmatier niedergeworfen; aber kaum war der Dalmatische Krieg zuende, als „Fünf Tage“ (so schreibt Velleius Paterculus ein paar Jahre danach), „nachdem Tiberius seine Hand auf Pannonien und Dalmatien gelegt hatte“<sup>1)</sup>, die Nachricht von der Niederlage des Varus eintraf. Also wohl im Herbst des Jahres 9 n. Chr. verlor Rom in Germanien drei Legionen und einige Hilfstruppeneinheiten, wie Velleius Paterculus, dem wir auch das genaue Datum verdanken, berichtet. Und zwar fand diese Schlacht „im Teutoburger Wald“ statt, wo noch lange – dies berichtet Tacitus<sup>2)</sup> – die Toten der Varusschlacht unbeerdigt lagen.

So viel zu Ort und Zeit. Wie kamen die Römer nun aber dorthin und wer war dieser Varus? Seit langem war der Rhein die befestigte Ostgrenze des römischen Gallien gewesen. Die Nordgrenze des römischen Reiches bildeten die Alpen. Um diesen Winkel

<sup>1)</sup> *Vellei Paterculi Historiarum ... Libri Duo*, hrsg. von W. S. Watt, Teubner 1988; 2, 117, 1 (zum *tantum quod* s. *Latein. Grammatik* von Kühner-Stegmann 2, 2; 272); zur Sache H. Bengtson, *Grundriß der römischen Geschichte* 1, 1967, 271; D. Kienast, *Augustus* (1982), 304 ff.; D. Timpe, *Arminius-Studien* 1970.

<sup>2)</sup> Tac. *annal.* 1, 60, 3. Zur Strategie Kienast, 297 f.; zu den Verlusten Timpe, 109 (weniger als drei volle Legionen).

\* Vortrag vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

aus Rhein und Alpen aufzufüllen, machte Augustus sich an die Eroberung der den Alpen nördlich vorgelagerten Gebiete, und zwar mittels seiner Stiefsöhne Drusus und Tiberius als Feldherrn. Münzen und Schriftwerke priesen die Eroberungen. Auch das Gebiet des späteren Österreich wurde unterworfen. Dann plante der Kaiser, z.T. persönlich in Gallien anwesend, die Eroberung Germaniens: feste Lager in Mainz, Neuß und Xanten wurden errichtet. Schon Caesar hatte den Rhein nicht als definitive Grenze römischen Herrschaftsbedürfnisses angesehen, und als sein Erbe in so vielen Dingen, nun auch in dieser Hinsicht plante Augustus den Einmarsch nach Germanien. Im Jahre 8 v. Chr. unterwarfen sich alle Germanen zwischen Rhein und Elbe dem Kaiser, nachdem Drusus und Tiberius allenthalben siegreich gewesen waren. Überall findet man noch heute Marsch- und Standlager auf germanischem Boden. Doch kam es bald zu Aufständen, und noch im Jahre 4 n. Chr. sandte Augustus den Tiberius, nunmehr seinen Adoptivsohn, erneut nach Germanien. Er durchzog das Land, überwinterte sogar in ihm und traf sich im Frühjahr an der Elbmündung mit einer römischen Flotte.<sup>3)</sup>

Als die Germanen während des Pannonienaufstandes die Verwundbarkeit römischer Heere gesehen hatten, erwachte nun auch in ihnen selbst das Verlangen, sich wider die römischen Herrschaftsansprüche zu erheben. Tiefe Wirkung hat der Sieg des Arminius nicht gehabt; zwar ergriff Augustus mehrere Vorsichtsmaßnahmen in Rom und in den Provinzen, aber von seiner offensiven Germanien-Politik ist der greise Herrscher nicht abgewichen (hierin wird man wohl D. Kienast, 306, gegen manche andere Stimme Recht geben).

Varus – wer war er? Was hat er in Germanien getan, das die Germanen so gegen ihn und Rom aufbrachte? Publius Quinctilius Varus<sup>4)</sup>, geboren wohl im Jahre 42 v. Chr., hatte in Palästina auf sich aufmerksam gemacht, als er einen Aufstand gegen die auspressende Tributpolitik Roms brutal niederschlug und dabei u.a. Emmaus niederbrannte und Jerusalem besetzen ließ. Im Jahre 7 n. Chr. ging der 49jährige nach Germanien als Legat des Kaisers. Offenbar betrieb er dort eine vorschnelle Befriedungspolitik, indem er versuchte, die Germanen allzu eilig an römisches Recht zu gewöhnen, d.h. ihnen ihr Stammesrecht abzugewöhnen.<sup>5)</sup>

Er wird dies von einem festen Sommerlager aus getan haben. Wie es dann Arminius, wohl als Präfekten eines regulären Stammeskontingents innerhalb der römischen Auxiliärverbände, gelang, den römischen Legaten, dessen Tischgast er des öfteren war (wie Tacitus berichtet), davon zu überzeugen, er müsse – wohl auf dem Zuge ins ständige Winterlager – eine Art „Abstecher“ unternehmen durch das östliche Wesergebiet, das wissen wir nicht. Wahrscheinlich gaukelte er ihm einen leichten Sieg über irgendwelche fiktiven Aufständischen oder jenseits der Elbe ansässigen Eindringlinge vor. Genug, im September des Jahres 9 n. Chr. zog Varus ins Gebiet des Teutoburger Waldes.

Es sollen nun die antiken Berichte über das besprochen werden, was dort in dem sumpfigen, waldigen Lande vorgefallen ist.

<sup>3)</sup> *Vell. Pat.* 2, 104, 2; Kienast, 303.

<sup>4)</sup> Über ihn s. *Kleine Pauly, Lexikon der Antike* 4 (1962), 1298, 26 ff.

<sup>5)</sup> *Vell. Pat.* 2, 117, 4; 118, 1, Ende.

Es ist das Geschäft des Historikers, aus den Quellentexten die bedauerlich wenigen wahrscheinlichen Details zu entnehmen, um zu erkennen, „wie es denn gewesen“, d. h. er muß die Texte zerbröseln. Das Geschäft des Philologen dagegen ist es, seine Texte nicht zu zerstückeln, sondern aus ihnen zu erschließen, was da ursprünglich gewollt war. So auch heute; ich frage, was Velleius Paterculus, der Militärtribun im 1. Jahrhundert n. Chr., was Cassius Dio, Consul Suffectus und Ordinarius unter Septimius Severus im 3. Jahrhundert n. Chr., was Annaeus Florus, der Literat hadrianischer Zeit, gewollt hatten, um dann festzustellen, was an Details überhaupt zu erwarten ist und wie viele.

# I.

Was Velleius (19 v. Chr. – 30 n. Chr.) gewollt hatte, wird er im Proöm gesagt haben, doch es ist verloren. Er wird, das kann man aus späteren Stellen ermitteln, von Kürze und Eile gesprochen haben, von bescheidenem Stil und wohl auch von seiner Bewunderung für Kaiser Tiberius<sup>6)</sup>. Doch zunächst eine Paraphrase seines Varus-Kapitels (2, 117/9).

Eben erst (s. A. 1) hatte Augustus den pannonisch-dalmatischen Krieg beendet, als binnen fünf Tagen erneut erschreckende Nachrichten eintrafen: in Germanien sei Varus mit drei Legionen, drei Alen und sechs Kohorten vernichtet worden – Velleius hatte also eine genaue Zahlen bietende Quelle vor sich. Es schien, so fährt er fort, als habe Fortuna in einer Kette der Nöte nur soviel zugestehen wollen, daß der Kaiser den neuen Krieg wenigstens nicht mitten in einem bereits wütenden Kampfe beginnen müsse – Fortuna also als Agens. Nun Varus.

Zu Beginn eine Charakteristik: ruhig, zur Muße neigend und – diese Angabe hängt in der Luft – dem Gelde zugetan, verfiel er auf den Gedanken, er könne die nördlichen Wilden durch das Recht mildern, und so verbrachte er den Sommer mit der Abhaltung von Gerichtstagen.

Die Germanen – sprich: die von Armin überredeten und instruierten Germanen in und um Varus' Amtsbereich – gaben denn auch vor, sich dem Rechte beugen zu wollen, inszenierten allerhand Rechtsfälle und lullten den Römer vollkommen ein, so vollkommen, daß er Armin glaubte, als der von einer Bedrohung redete. Er zog auf eine Sicherungsoperation aus, taub für alle Warnungen: die Gottheit, so beschließt Velleius diesen Abschnitt nach alter Weise mit einer Sentenz, verblendet ja, will sie einen verderben, sein Planen (118, 4).

Das Folgende leitet der Autor, der hübsch schreiben und klar gliedern möchte, mit einem Programmsatz ein (119, 1): angesichts der versprochenen Kürze bliebe ihm nur übrig, das Gesamtergebnis dieses Zuges zu „beweinen“, der da zu solchem Verluste führte durch die Blindheit des Feldherrn, die Tücke des Feindes und die Ungunst Fortuns. Dabei hatten die Legionäre keine Chance der Gegenwehr, und wer es versuchte, wurde um so bitterer bestraft – sehr kryptische Sätze, kryptische Reflexe seiner Quelle. Und das alles von der Hand derer, die man sonst abzuschlachten pflegte wie das

<sup>6)</sup> Zu Velleius als Historiker s. A. J. Woodman, *Velleius Paterculus*, Cambridge 1988.

Vieh – Ausdruck des Chauvinismus, Ausdruck aber auch für die beweinswerte Paradoxie der Lage.

Varus, nach dem Vorbild von Vater und Großvater, tötete sich selbst; die Lagerpräfekten, die nächstniederen Offiziere, zeigten verschiedene Haltungen: der eine offenbar gute (Velleius beläßt es beim Hinweis, offenbar auf Bekanntes), der andere bedenkliche, denn er riet zur Kapitulation, der dritte verwerfliche, denn er floh (doch wurde er gefaßt und starb mit dem Makel des Verräters).

So geschehen durch verkehrte Einschätzung des Feldherrn, aber das Heer starb tapfer und blieb unbefleckt. Tiberius brachte die Lage dann wieder zur Ruhe.

Blicken wir über diese Episode jetzt aufs Ganze, so sehen wir, wie Velleius am Anfang seines Werkes Universalgeschichte zu schreiben beginnt (sogar mit griechischer Geschichte und literaturhistorischen Exkursen), dann tritt die Kaisergeschichte allein in das Blickfeld. Wachsen und Schwinden sind die Leitvorstellungen, Stillstand gibt es nicht. Und die treibenden Kräfte sind eine unbestimmt bleibende, oft paradoxe Fortuna und genau angebbare Tugenden oder Laster von Männern – daher die vielen plutarchisch anmutenden Persönlichkeitsvergleichen.

Diesen Weg zur Größe Roms unter Tiberius, dem Velleius lange im Felde gedient hatte, beschreibt Velleius in aneinandergereihten Hauptgeschehensdarstellungen, kaum je in kausalem Konnex, sondern als erinnernswerte Episoden im Drama der Reichswerdung. Erinnerungswert ist dabei das Staunenswürdige, und dies ist menschliche Größe oder Vernichtung, ist das Spiel des Glücks, das da erhebt und niederwirft. Kurzum: Velleius beschreibt das *Erregende*, dies jedoch nicht in genau und detailreich gemalten Bildern, sondern mit Hilfe *mentalen* Eindrucks durch Emotion-weckende Wörter und Ausdrücke (wie „beweinen“ oder „wehrloses Abschlachten“).

Seine Geschichtsschreibung huldigt demnach der Idee einer Aszendenz und will beeindrucken durch Reihung von Hauptfakten, deren Bericht gefärbt wird durch Affektivketten. Da wird es denn verständlich, wie viele und wie geartete Details er aus seiner (in Umrissen noch erahnbaren) Quelle herauslöste: es waren zum einen solche Einzelheiten, die das große Schreiten der Geschichte auf des Tiberius Reich zu anzeigen, und zum anderen solche, die das so häufig erstaunende und erschreckende Zusammenspiel von launischem Glück und menschlicher Schwäche verdeutlichten. Und noch in einer dritten Funktion treffen wir Detailverwendung, nämlich in der des Gliederungsmittels: gern erzählt Velleius eine Einzelheit am Ende einer größeren Kompositionseinheit vor einem neuen Sachgefüge. – Diese Dinge muß man wissen, bevor man an den Velleius-Text geht in der Jagd nach Details.

## II.

*Cassius Dio* (ca. 155–235 n. Chr.)<sup>7</sup>

Auch hier ist das Proöm verloren, wie bei Velleius muß man die historiographischen Prinzipien des Cassius erschließen. Sein Werk ist sehr lang und er erzählt sehr breit, so

<sup>7</sup>) Zum Namen A. M. Gowing, *Class. Phil.* 85, 1990, 49 ff.; zu Cassius als Historiker M. Reinhold, *From Republic to Principate* (1988); F. Millar, *A Study of Cassius Dio* (1964), 43 weist auf die Detailarmut hin.



kann er sich z.B. angesichts der Schlacht bei Pharsalos<sup>8)</sup> nicht genug tun beim Herausstellen des Perversen, daß da Bekannte und Verwandte aufeinandergehetzt wurden; Stimmung, Rufe, Wiedererkennungsszenen, dann das Ineinander von Verwunden und Verwundetwerden, Töten und Getötetwerden – ein grausiges Gemälde, würdig des Schlachtensaaes von Versailles. Und diese kurze Bemerkung führt dann schon zum Kern.

Wenn Cassius z.B. sagt, viele hätten Nachrichten nach Hause gesandt durch Bekannte, die auf der anderen Seite fochten, und zwar oft durch solche, von denen sie im nächsten Augenblick getötet wurden, dann ist das ein „Gemälde“ oft aus Tönen und Gesten, zumeist aus abstrakter Orientierung wie „da mußte Vater gegen Sohn kämpfen“. Es sind Bilder des Leidens zumeist, ohne strategische, politische oder geographische Detailangaben. Obschon viel detailreicher, bleibt auch Cassius in dieser Weise vielfach im Bereich *mentaler* Beeindruckung, doch im Unterschied zu Velleius gibt er nicht immer nur Allgemeinheiten (wie Velleius 119, 2: „die Römer hatten nicht einmal die Chance zu kämpfen oder sich aus dem Gewühl zu lösen“), sondern schildert auch Einzelheiten wie „beim Aufprall der Schlachtreihen hörte man Gegeneinanderrennende den Anstürmenden beim Namen rufen“.

Gut, also Details auch sinnlicher Beeindruckung. Prüfen wir dieses erste Ergebnis anhand einer Paraphrase des Varus-Kapitels.<sup>9)</sup> Schon waren die Germanen im Begriffe, den Stil römischen Provinzlebens zu lernen, da machte der neue Statthalter Varus den Fehler, diesen Prozeß zu beschleunigen (ἔσπευσεν): er forderte Steuern wie von Untergebenen und unterwarf die Germanen römischem Rechtsbrauch. Das rief eine Revolte hervor, geführt von Armin, der sich in das Vertrauen des Varus einzuschleichen wußte und ihm dann weismachte, Nachbarvölker bedrohten die Grenze.<sup>10)</sup> Varus zog mit drei Legionen gegen sie aus, eine „leichte Beute“, sagt Cassius, für die Rädelsführer, die zunächst mitzogen, sich dann aber entfernten, um – wie sie sagten – ihre Auxiliarverbände gegen die Bedrohung in Marsch zu setzen. Sie setzten sie aber gegen die Römer in Marsch. Inmitten hügeligen Waldgeländes, als die Straße oft abschüssig und uneben wurde, die Bäume dicht und unmäßig groß, als schwerer Regen fiel, der Boden „um Stämme und Wurzeln glitschig war“, und alles zusammen den Zug der Soldaten, Frauen und Kinder, der Lasttiere und Wagen aufs stärkste behinderte, da schlugen von allen Seiten die Germanen los. Zunächst durch Schießen, dann, wie die unvorbereiteten Römer sich nicht recht zu wehren vermochten, im Nahkampf.

Zwar ließen die mitgenommenen Römer am nächsten Morgen im Marschlager die Wagen und sonst Entbehrliches zurück, kamen streckenweise auch auf leichteres Gelände, gerieten dann aber wieder in Wälder, wurden erneut angegriffen und „erlitten schwere Verluste gerade dann, wenn sie sich wehrten“, wie Cassius (ähnlich dem Velleius) einigermaßen unverständlich kürzend seine Quelle wiedergibt. In einem Engpaß behinderten Pferde, Bäume und sie selbst sich gegenseitig so sehr, daß erneut schwere

<sup>8)</sup> *Dio Cass.* 41, 53 ff.

<sup>9)</sup> *Dio Cass.* 56, 18, 1 ff.

<sup>10)</sup> *A. O.* 56, 19, 3; s. Timpe [A. 1], 107 f.

Verluste eintraten. Und am vierten Tage waren sie so durchnäßt, und dann auch noch Pfeile, Schilde und Speere – man denke: durchnäßte Speere! –, daß die endgültige Vernichtung nicht mehr aufzuhalten war, viele töteten sich selber, und so auch Varus.

Diese Geschichte steht nun nicht isoliert im Werke Dios. Eingelassen ist sie in eine Gesamtgeschichte Roms von den Anfängen bis Septimius Severus, und diese steht ihrerseits unter einer Art Welt-Sicht, die besagt: alles hat einen guten, jugendfrischen Beginn und fällt dann mählich ab; so auch der Weg Roms: er kulminierte in Augustus, doch dieser bereits trug Keime des Niedergangs in sich. Ganz anders als die freudige Aszendenz bei Velleius ist Cassius beherrscht vom Pessimismus der Deszendenz, er hatte sie in der Gestalt seines Kaisers, der so gut begann und dann doch entartete, selber erleben müssen. Was auf Augustus folgte, waren unsägliche Leiden, besonders des Senates und der Heere: *quidquid delirant reges, plectuntur Achivi* (Hor. ep. 1, 2, 14). Insbesondere die Persionen der Bürgerkriege und die Verluste durch unfähige Führer und Statthalter prangerte er an, und hierher gehören die Pharsalus-Episode und das Varus-Kapitel.

Ist die Varus-Geschichte so ins Gesamt eingeordnet, muß jetzt nach ihren Einzelheiten gefragt werden. Sie ist, im Allgemeinen, als eine führungsverschuldete Pathologie des Heeres angelegt. Da werden dann weder Angaben über Truppenstärke, Marschrichtung und Kampfziel gemacht, noch werden Ursachen und Anlässe des Ganzen oder von Einzellnem genannt: alles ist dem Darstellungsziel untergeordnet, Leiden zu schildern. Dies Ziel ist dann auch das Auswahlkriterium für die Detailverwendung: Dio kannte viele (nicht zuletzt aus derselben Quelle, die auch Velleius verwendet hatte), was er aus ihnen wählte, war von der Art, daß es das sinnliche Vorstellungsvermögen beeindrucken sollte und auch das „innere Auge und Ohr“ im Dienste der Pathologie. Zudem sollte der Leser nicht ins Kleinliche einer pragmatischen Historiographie hinabgedrückt werden, die Geschichte hatte für Dio ihre eigene Würde (ὄγκος), und die mußte *auch* durch Meidung störender Details gewahrt werden.

Es ist nicht ganz so, wie Ed. Schwartz<sup>11)</sup> geurteilt hatte: „Die Schlachtbeschreibungen Dios sind ausnahmslos rhetorische Schildereien ohne jeden Wert“. Zum einen sind sie recht verschiedenartig in Bau, Färbung und Ziel; zum anderen enthalten sie immer auch wertvolle Details (allgemein gilt für Dio wie für Velleius: besonders die zunächst unverständlichen Details enthalten Reste einer gut informierten Quelle); und drittens sind diese Beschreibungen nicht einfach bloß rhetorisch und wertlos, sondern sie erheben das Denken und Empfinden eines Mannes, der in vielversprechender Zeit sich als junger Mann der Politik verschrieben und in sinkenden Tagen von ihr Abschied genommen hatte, um aus kenntnisreicher und erlebensgesättigter Distanz das Erlebte als Einzelteil eines gewaltigen Prozesses zu begreifen. Er bleibt ein wertvoller Zeuge für die Stimmung der Nachdenklichen gegen Ende des Septimius Severus, auch wenn er thukydideische Historizität in Chronologie, Feldherrn-Überlegungen, Geographica, Strategica, Logistica für unter der „Würde der Geschichte“ ansah. Was er geben wollte,

<sup>11)</sup> *Griechische Geschichtsschreiber* (1957), 403 (= *Realencyclop. der Altertumswissenschaft* [Pauly-Wissowa] 2, 1895, 216 ff.).

gab er gut: die Pathologie eines Weltreiches durch die Wechselspiele der Tyche und die Laster der Menschen, und da weiß er die mentalen und die sinnliche Emotion gar trefflich zu bewirken.

### III.

*Annaeus Florus* (2. Jahrhundert n. Chr.)<sup>12)</sup>

In seinem Proömium verkündet Florus, er wolle in Perioden die Größe Roms darstellen, welche auf menschlicher Leistung (*virtus*) und der Gunst des Glückes (*Fortuna*) beruhe. Er unterscheidet, sogar mit Jahresangaben, Roms Jugend vom Greisenalter und erkennt die hohe Manneszeit des Reiches in der kraftvollen Expansion unter Augustus. Die Kritiker haben ihm da Fehler in der Periodenberechnung angekreidet, haben über seinen metaphernreichen Stil gehandelt, dabei aber ein Prinzip der Materialordnung übersehen.

Z.B. das *Bellum Illyricum* (2, 23): „Die Illyrer leben am Fuße der Alpen, wachen über deren Täler und die Barrieren dort aus sich windenden Sturzbächen“, d.h. er macht eine nur sehr ungefähre Ortsangabe und fügt ein einziges Charakteristikum bei. Weiter: „Gegen sie unternahm (Octavian, der spätere) Caesar selber einen Feldzug und ließ Brücken schlagen“ – seltsam, dieses eine isolierte Detail, aber es schloß eben gut an die „Sturzbäche“ an. „Als das Heer, in Angst vor Feind und Wasser – d.h. dem reißenden Strom eines Bergbachs – zögerte, die Brücke zu betreten, riß der Feldherr einem Legionär den Schild vom Arm und machte sich als erster auf den Weg. Das Heer folgte, die Brücke brach und der Feldherr wurde verletzt. Der aber zerschlug, grandios anzusehen in seinem Blut und erhoben durch die bestandene Gefahr, die Rücken der Feinde durch und durch“. Also zu Anfang der Locus mit einem charakteristischen Detail, dann eine lobpreisende Anekdote und das Resultat.

Dies Schema „Ort – Besiegungsgeschichte – kennzeichnendes Detail“ setzt sich fort bis zum Germanenkrieg unter Varus.<sup>13)</sup> Ein emphatischer Einleitungssatz („Hätte Caesar nur nicht Germaniens Besiegung für so wichtig gehalten!“) gibt den Locus und versetzt in eine beunruhigende Stimmung zugleich. Immerhin, es wäre gelungen, „wenn die Barbaren“ (so heißt es da) „unsere Laster ebenso hätten ertragen können wie unsere Herrschaft“ – also der Topos des persönlichen Versagens. Drusus nämlich, so fährt Florus fort, hatte einige Stämme unterworfen und – jetzt folgt das kennzeichnende Detail – aus den Spolien der Markomannen ein Tropäon errichtet. Dann wandte er sich gegen weitere, die römische Soldaten gekreuzigt und im Vorgefühl des weiteren Siegens die erwartete Beute schon vor dem Endkampf aufgeteilt hatten – doch es kam anders. Drusus siegte, errichtete Kastelle an Maas, Elbe und Weser, und bald begann dieser Teil Germaniens römischen Brauch anzunehmen; Menschen, Erde und gar das Wetter schienen sich zu ändern – sogar das Wetter! –, aber (so gliedert der kompositionsbewußte Autor mittels einer Sentenz), „es ist schwerer, eine Provinz zu

<sup>12)</sup> Zu Florus L. Havas, *Zur Geschichtskonzeption des Florus*, *Klio* 66, 1984, 590 ff.; J. M. Alonso-Nunez, *Die politische und soziale Ideologie des Geschichtsschreibers Florus*, 1983, 30 ff.

<sup>13)</sup> Flor. 2, 30, 30 ff., Text bei: L. Annaeus Florus, hrsg. und übers. von E. S. Forster, Loeb-Libr. 1984, 339 ff. Abfassungszeit: etwa zwischen Hadrian und M. Aurel, s. Havas [A. 12], 53 ff.

halten als sie zu erobern“. Denn diese Germanen, eher nur besiegt als endgültig gezähmt, waren (solange der charakterfeste Drusus dort war) eher durch Roms *mores* zurückgehalten als durch Waffen; als aber des Varus Hoffart und Üppigkeit kamen und er gar ein Edikt gegen die Chatten erließ (man soll heraushören: wie er gegen Abtrünnige erniedrigend nach römischem Recht vorging), da erwachte die alte Sehnsucht nach Schwert und Roß; Varus aber, obgleich gewarnt, rief die Germanen zu einem Gerichtstage, und flugs griffen die Barbaren von allen Seiten an und rieben die Römer auf.

Was hat Florus also aus einer detailreichen, guten Überlieferung (man denkt da an seine recht genaue Angabe über die Kastelle an Maas, Elbe und Rhein) gemacht? Die kürzeren *Bella* reduzierte er auf das dürre Schema „Ort – *Mores* – Besiegung – kennzeichnenden Detail“; die längere Varus-Episode folgt dem gleichen Muster, doch mit mehr Einzelheiten, aber auch nur solchen, die zum Schema gehören und die *mores* illustrieren. Die *mores* sind zumeist auf Primitivcharakteristiken reduziert, auch im Falle des Varus. Einzelheiten der Begründung von Feldzügen teilt er nicht mit (z.B. strategische Überlegungen), er will nur beeindrucken, in der näheren Umgebung des Varus-Kapitels durch den Bericht von der Energie und Kraft, mit welcher der starke Kaiser und seine ihm verwandten Feldherrn das Reich mehrten, der schwache Varus es minderte.

#### IV.

Überblickt man jetzt die drei Textgruppen am Ende, so sieht man die Varus-Episode jeweils eingelassen in eine Stimmung. Velleius erzählt sie als schmerzlichen, aber nicht entscheidenden Rückschlag inmitten der begeisternden Ausweitung und Stärkung des Reiches; Florus als einen schmerzhaften, aber nicht nachhaltigen Aufenthalt auf dem Wege des Augustus zu einem Reiche, das der gesamten Oekumene Frieden schenkte (2, 34, 64) und moralische Erneuerung durch neue Gesetze, und zur eigenen Vergöttlichung (ebd. 66); Cassius preist an Augustus sein Maßhalten in der Ausübung der Macht (56, 43, 4) und weiß zu berichten, daß während seiner langen Regierung die Zeit eine bedeutende Rolle spielte, die Rolle allmählicher Gewöhnung (ib. 44, 3 f.). Eben dieses Zeitlassen wäre auch in Germanien heilsam gewesen (56, 18, 2), doch Varus trieb die Provinzwerdung eilends voran (ἔσπευσεν: 18, 3), und so kam es dort zur Katastrophe. Unabhängig also von Aszendenz oder Deszendenz als Grundansicht der Autoren, ist die Varus-Episode in eine zustimmende bis bewundernde Stimmung zugunsten der Reichsmehrung des Kaisers eingelassen. Diese Stimmung verursacht dann auch die Beschränkung im Berichten von Einzelheiten: es geht im allgemeinen nicht ums „Wie es war“, sondern um ein „So großartig war es“, in Varus' Fall um das Gegenteil, und um diese Kontraposition herauszustellen, bedarf es nur weniger Details.

Wodurch wurde nun Varus selbst zum Gegenteil? Durch seine *mores*. Er ist ein *exemplum morum*, aber schlechter. Auch dies beschränkt die allen drei Autoren sehr wohl möglich gewesene Detailmitteilung. Und noch ein letztes hat mitgewirkt, ein Interesse an historischer Vollständigkeit zu unterbinden: Varus ist zwar tadelnswert wegen persönlicher Fehler (z.B. Geldgier), aber darüber hinaus dient seine Charakteristik und sein Tun als ein allgemein-verbindliches abschreckendes Beispiel: bei

Velleius, weil er genau das nicht hat, was den bewunderten Tiberius auszeichnete; Umsicht bei großer Energie; bei Cassius bewirkte er unglaubliches Leiden, bei Florus zeigt er – im Unterschied zu des Drusus Wachsamkeit und Vorsicht (2,30,26) –, wohin selbstgefälliger Leichtsinn und Leichtgläubigkeit führen können. Also auch der Exemplum-Charakter dieser Schriften war einer reicheren Mitteilung von Details ungünstig.

Hinzu kommt zu guter letzt, daß alle drei Autoren ihre Texte unter ethisch zu nennende Prinzipien stellten. Diese Prinzipien sollten in jedem der drei Fälle Geschichte als Prozeß, als einen ethischen Prozeß einsichtig machen; aber genau diese Prinzipien waren es, welche die Detailmitteilung enger Beschränkung unterwarfen.

Darum ist heute das Geschäft des zergliedernden Historikers so mühsam, das des alles wieder sammelnden Philologen recht einfach, denn es waren recht einfache Prinzipien, und sie angedeutet zu haben, soll nun auch genug sein.

## V.

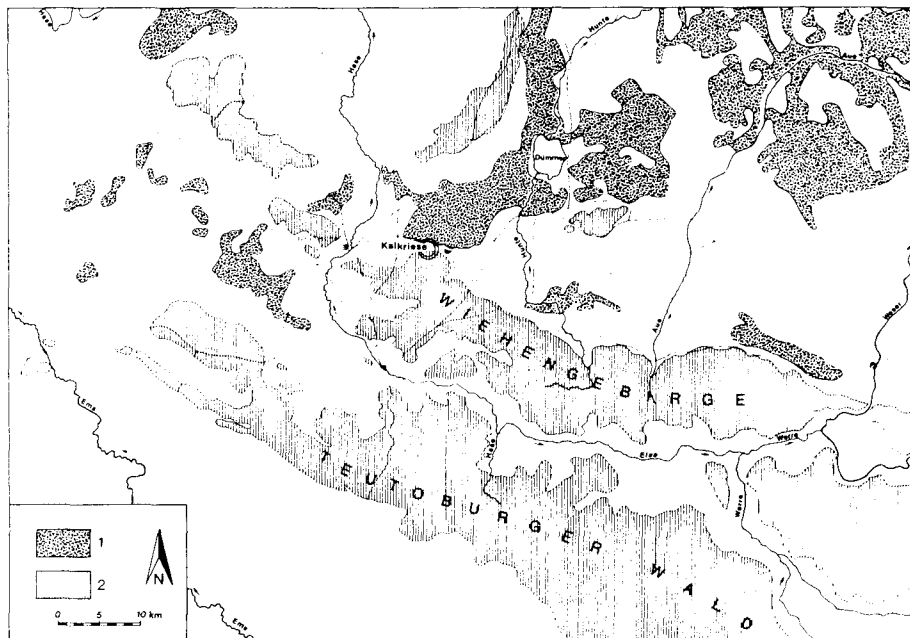
Nun zuletzt die aktuelle Frage, wo dieser Schlachtort denn gewesen sein könnte.<sup>14)</sup> Seit dem 17. Jahrhundert sind Münzfunde aus dem Gebiet östlich der Stadt Bramsche, die im Norden von Osnabrück liegt, bezeugt; und schon Th. Mommsen nahm an, daß es diese Gegend war, in der die berühmte Hermanns-Schlacht stattfand. Andere nahmen andere Orte an, bis dann 1987 ein Denarschatz am Lutterkrug bei Barenaue gefunden wurde. Nun setzten systematische Grabungen ein und sehr bald fand man eine große Zahl weiterer Münzen, Panzerteile, Waffen, Geschosse, Pferdegeschirr und Gebrauchsgegenstände, eine Wallanlage trat zutage, so daß sich die Stimmen mehrten, die hier den Ort der Varus-Schlacht anzusetzen gewillt waren.

Was für ein Ort ist das? Entlang am Wiehen-Gebirge führt eine alte Straße, vorbei an sanften Hügeln auf der südlichen, an Mooren an der nördlichen Seite. D.h. es handelt sich um eine Thermopylen-Lage: von Ost kommend, wandert man auf einer begehbaren Zone von 4000 bis zuweilen 50 Metern Breite zwischen sandigen Waldhängen links und tiefem Moor rechts. Entlang den bewaldeten Sandhügeln findet sich eine Wallanlage. Sie ist heute nur an Bodenverfärbungen abzulesen und läßt eine Profilhöhe von ca. 30 cm (die Ausgrabung ist noch längst nicht zuende geführt) erkennen. Immerhin darf man schon heute sagen, daß keiner der bisher vorgeschlagenen Schlachtorte so gute Chancen hat, sich endgültig als der des Arminius-Sieges zu erweisen, wie die Stelle bei Kalkriese – Bramsche.

Aber was ist, außer den Resten einer Vernichtungsschlacht, d.h. außer einem Ort und einer Anzahl trauriger Reste, die dem Betrachter, der die Geschichte kennt, den entsetzlichen Untergang eines Heeres samt Frauen und Kindern einen Schauer den Rücken entlanglaufen läßt, für die Wissenschaft gewonnen?

Nun, zunächst einer der seltenen Fälle, die einen direkten Vergleich von antikem Bericht und heutigen Bodenbefunden erlauben. Zweitens aber, und das hängt mit dem ersten Punkt eng zusammen, erkennen wir, daß die Quelle unserer antiken Berichte

<sup>14)</sup> Zum Folgenden: *Antike Welt* 22, 1991, 4 (Sonderdruck); W. Schlüter, *Römer im Osnabrücker Land*, Masch-Verlag (Bramsche) 1991.



*Die Lage des Fundplatzes Kalkriese am Nordrand des westlichen Weserberglandes zwischen Ems und Weser und der Verlauf der im 17./18. Jahrhundert durch den Engpaß von Kalkriese-Niewedde führenden Fernverkehrswege. 1 Moor. – 2 Bergland.*

vielleicht genaueres Faktenmaterial bot als die Nachschreiber, daß diese aber genau das Wichtigste nicht bieten: Motiv und Mittel zur Vernichtung des Heeres. Denn, um auf das Hauptmittel zu kommen, das die Germanen anwandten – die Fangwall-Anlage –, so hören wir von ihr in den Quellen kein Sterbenswörtchen. Man kann darüber spekulieren, warum nicht: war die Quelle, die sowohl Velleius als Dionys benutzten, selber schon unvollständig oder haben ihre Benutzer sie beide unvollständig ausgeschrieben? Hatte der Verfasser der Quelle keine kompetenten Überlebenden als Berichterstatter zur Verfügung gehabt? Man kann spekulieren, Sichereres ist nicht mehr auffindbar.

Wohl aber können wir am Schluß eine Vermutung über die Absichten des Varus wagen. Es haben sich Schnellwaagen-Gewichte gefunden und eine seltsame Gesichtsmaske.<sup>15)</sup> Sie besteht heute aus Eisen, früher hatte sie einen Silberüberzug (G. Franzius 53). Solche genau aufs Profil gearbeiteten Masken sind seit dem 1. Jahrhundert n. Chr. aus Germanien und Gallien, aus Thrakien und aus Syrien bekannt. Die viel zu kleinen Augenöffnungen ebenso wie die für Mund und Nase machen die Maske unanwendbar im Kampf, wohl aber werden solche teuren Silbermasken als Vorsatzstücke am Prunkhelm verwendet worden sein. Trifft das zu, dann darf man – die Waage hinzu-

<sup>15)</sup> G. Franzius in: *Römer im Osnabrücker Land* [A. 14], 53 ff.

genommen – vermuten, daß Varus mit „Sack und Pack“ gezogen war, nicht auf einem raschen Feldzug, sondern heim ins Winterlager, nur mit einem Umweg, um rasch noch vorher einen schnellen Erfolg einzuheimsen. Was dabei herauskam, habe ich in Kürze geschildert.





HANS BÜRGER, Wuppertal

**Kurzlebigen Molekülen auf der Spur**

Braunschweig, 13. November 1992\*

Kurzlebige Moleküle sind Durchgangsstationen chemischer Umwandlungen auf dem Weg zu stabilen Endprodukten. Sie treten bei chemischen Synthesen in Laboratorium und Technik auf, bilden sich bei Zerfallsprozessen und in Abbaureaktionen und spielen eine Rolle als Vorstufen der belebten Materie. Wenn auch die Suche nach ihnen erschwert ist, weil sie nicht recht zu fassen sind, so hat dennoch das große Interesse an ihrer Zusammensetzung, ihrer Struktur und ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften viele Wissenschaftler zu Anstrengungen veranlaßt, mehr über sie zu erfahren.

Freie Moleküle, wie sie in der Gasphase vorliegen, sind entweder langlebig – oder sie zerfallen: sei es ohne äußere Einwirkung, sei es im Stoß mit anderen Molekülen oder gegen feste Wände. Je schneller sie fliegen, d.h. je höher ihre Temperatur ist, desto zerstörerischer wird der Zusammenprall sein. Je dichter die Materie ist, desto kürzer wird ihre freie Flugbahn, desto häufiger kommt es zu Kollisionen. Hoher Druck und hohe Temperaturen verringern also ihre Lebensdauer.

Die hier behandelten Moleküle sollen bei Raumtemperatur und darunter und bei Drücken bis zu wenigen Millibar – also bei Bedingungen, wie sie im Inneren einer (abgeschalteten) Glühlampe herrschen – Lebensdauern im Bereich von wenigen Sekunden bis zu einigen Minuten haben. Für die Vorgänge im Inneren eines Moleküls ist das eine Ewigkeit, während der Forscher sich sputen muß, will er etwas über die Moleküle erfahren.

Da die Moleküle wegen ihrer Kleinheit – mit Abmessungen von nur einigen  $10^{-7}$  mm – nicht direkt beobachtet werden können, benötigt man eine spezielle Molekülsonde, die Differenzen ihrer Energiezustände mit hoher Genauigkeit erkennt. Solche Energiedifferenzen müssen molekülspezifisch sein und mit höchster Genauigkeit bestimmt werden können.

Ein freies n-atomiges Molekül verteilt seine  $3n$  Freiheitsgrade der Bewegung als Energiepakete: drei auf die Translation (freier Flug in x-, y- und z-Richtung), drei auf die Rotation (um die x-, y- und z-Achse) und  $3n-6$  auf innere Schwingungen ( $3n-5$  bei linearen Molekülen, dann aber nur zwei für die Rotation). Während Rotationsenergie (eigentlich der Drehimpuls) und Schwingungsenergie gequantelt sind, unterliegt die Translationsenergie keiner Quantelung:

$$\text{Drehimpuls } I\omega = \frac{h}{2\pi} \sqrt{J(J+1)}.$$

---

\* Vortrag vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (Zusammenfassung)

Daraus folgt für die Rotationsenergie  $E_{\text{rot}}$  z.B. eines linearen Moleküls:

$$E = BJ(J+1), \quad B = \text{Rotationskonstante, molekülspezifisch,}$$

$$J = \text{Rotationsquantenzahl,}$$

$$h = \text{Planck-Konstante.}$$

Die Schwingungsenergie  $E_{\text{vib}}$  ist gegeben durch:

$$E_{\text{vib}} = h\omega\left(v + \frac{1}{2}\right),$$

$$\omega = \text{Schwingungsfrequenz}$$

$$v = \text{Schwingungsquantenzahl}$$

Diese Energien müssen im Realfall durch Terme höherer Ordnung ergänzt werden. Für ein zweiatomiges Molekül A-B stellen sich die Energieniveaus wie in Abb. 1 gezeigt dar. Für mehratomige Moleküle geht diese einfache Energieleiter in eine nicht mehr anschaulich darstellbare Abhängigkeit der Energie und der Geometrie von einzelnen Quantenzahlen über.

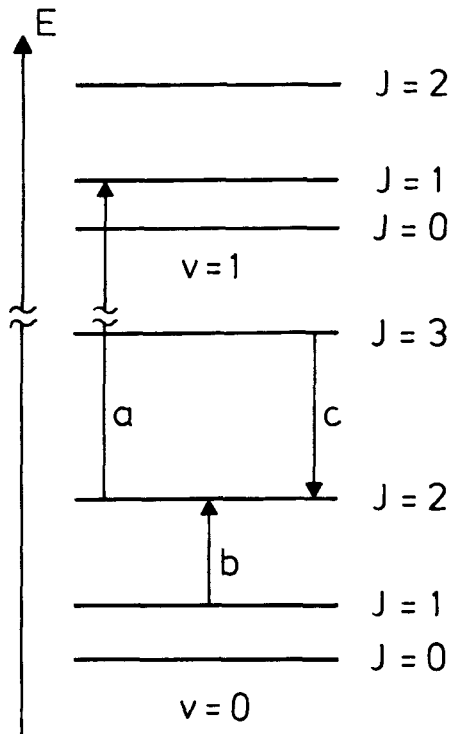


Abb. 1:  
Energieniveaus eines linearen Moleküls

$v = 0$ : Schwingungsgrundzustand  
 $v = 1$ : erster Schwingungsangeregter Zustand  
 $J$  sind Rotationsquantenzahlen

a: Schwingungsrotationsübergang  
 $P(2)$  in Absorption, s. Abb. 2  
b: Rotationsübergang  $J 2 \leftarrow 1$  in Absorption  
c: Rotationsübergang  $J 2 \leftarrow 3$  in Emission

Bei Wechselwirkung mit elektromagnetischer Strahlung (Wärme, Licht) besetzt ein Molekül höhere Niveaus in Einerschritten,  $\Delta J = 1$   $\Delta v = 1$ . Das sind bei Raumtemperatur vornehmlich angeregte Rotationszustände, während es im Schwingungsgrundzustand  $v = 0$  verbleibt.

Typische Energien zur Anregung der Rotation liegen im Bereich von  $0.1 - 100 \text{ cm}^{-1}$ , das entspricht einer Frequenz von  $3 - 3000 \text{ Gigahertz}$ , oder einer Wellenlänge von  $100 - 0.1 \text{ mm}$ , während typische Energien zur Anregung einer Schwingung mit  $h\nu = 400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  (Wellenlänge  $2.5 - 25 \text{ }\mu\text{m}$ ) um ein Vielfaches größer sind. Halten wir fest, daß unser Auge nur Licht von  $12000 - 25000 \text{ cm}^{-1}$ ,  $0.4 - 0.8 \text{ }\mu\text{m}$ , also Strahlung höherer Energie, wahrnimmt. Molekülschwingungen regen wir also mit Wärme an, im Infraroten.

Es sind Geräte entwickelt worden, welche die Energie im Infraroten mit höchster Wellenzahlgenauigkeit zu messen gestatten. Früher geschah das mit Prismen- und Gitterspektrometern, mit denen ein Spektrum abgetastet wurde. Routinemäßig betrug das Auflösungsvermögen  $\Delta\omega/\omega$  z.B.  $1:1000$ , d.h.  $\Delta\omega = 1 \text{ cm}^{-1}$  bei  $1000 \text{ cm}^{-1}$ , also mitten im Infraroten. Wenngleich spezielle Methoden (Diodenlaser, Seitenbandtechniken) bei eingegengtem Meßbereich heute ein Auflösungsvermögen von  $1:1 \times 10^6$  zu erreichen und unterschreiten gestatten, so setzt doch das Interferometer, für dessen Entdeckung A. A. Michelson 1907 den Physiknobelpreis erhielt, heute die Maßstäbe.

Schon kommerzielle Geräte erreichen ein Auflösungsvermögen  $\Delta\omega/\omega$  von  $1:10^5$  bis  $1:10^6$ ; Breiten von Absorptionslinien von  $2 - 5 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$  z.B. im Infraroten bei  $2000 \text{ cm}^{-1}$  sind heute routinemäßig erreichbar. Hochempfindliche, auf  $-196^\circ$  oder noch tiefer gekühlte Strahlungsdetektoren entdecken jedes Photon und lassen bei der genannten Auflösung ein Signal: Rausch-Verhältnis von  $100 - 1000$  leicht erreichen. Die Genauigkeit, mit der ein Absorptionspeak (Abb. 2) für einen Übergang (a) gemessen werden kann, beträgt dann  $1:10^7 - 1:10^9$ . Die gleiche – oder eine noch höhere – Genauigkeit erreichen Mikrowellen- und Millimeterwellenspektren, d.h. Übergänge im gleichen Schwingungszustand, z.B. innerhalb  $v = 0$ , Abb. 1, b. Da solche Übergangsenergien auch z.B. von Molekülwolken im interstellaren Raum ausgesandt (Abb. 1, c) werden, kann man mit höchster Sicherheit den empfangenen Energiebetrag einer Labormessung gegenüberstellen. So wissen wir mit Sicherheit, daß Molekülwolken im Sternbild Orion (OriMC 1) oder Stier (TMC 1) Cyano-polyine, Moleküle des Typs  $\text{H}(\text{C}\equiv\text{C})_n\text{-CN}$ , und auch die kurzlebigen, instabilen Isocyano-polyine,  $\text{H}(\text{C}\equiv\text{C})_n\text{-NC}$ , enthalten. Diese Moleküle sind zu den präbiotischen zu zählen und nur die Spitze des Eisberges an erdfernen organischen Verbindungen in – und wohl auch außerhalb – unserer Milchstraße. Ihre Entdeckung befriedigt nicht nur die Neugier der Wissenschaftler, sondern auch das Informationsbedürfnis all derer, denen die Frage auf den Nägeln brennt, woher das Leben kommt und ob außerirdisches Leben möglich wäre.

Im Laboratorium erlaubt das Interferometer, dessen Betrieb heutzutage durch schnelle Rechner zur Fourier-Transformation der Rohdaten wesentlich erleichtert wird, die hochgenaue Vermessung optischer Spektren zwischen Fernem Infrarot (wenige  $\text{cm}^{-1}$ ) und Ultraviolett ( $40000 \text{ cm}^{-1}$ ). Bleibt die Lebensdauer der untersuchten

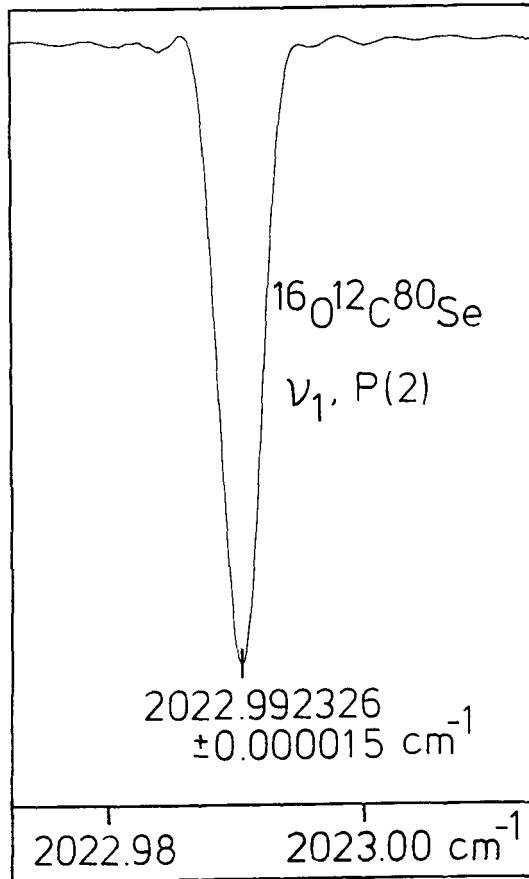


Abb. 2:

$P(2)$ -Absorptionslinie im  $\nu_1$ -Schwingungsrotationsspektrum von  $^{16}\text{O}^{12}\text{C}^{80}\text{Se}$

Moleküle selbst bei tiefer Temperatur und bei niedrigen Drücken unterhalb der Minutenschwelle, so erzeugt man im Fließsystem kontinuierlich neue Moleküle.

Ein Spektrum enthält tausende höchstgenaue Energiedaten mit zugehörigen Intensitäten. Diese kann man über Modellberechnungen einem bestimmten Molekül zuordnen. Die hohe Sicherheit der Schlußfolgerungen resultiert nicht zuletzt aus der Tatsache, daß sich sehr viele Meßdaten durch einige wenige Molekülparameter exakt reproduzieren lassen. Solche Molekülparameter beschreiben nicht nur die statische Struktur des Moleküls, sondern auch seine Dynamik. Sie lassen sich mit theoretischen Berechnungen vergleichen und erlauben Voraussagen über das reaktive Verhalten der Moleküle.

Hochaufgelöste Infrarotspektren ermöglichen also den Nachweis neuer Moleküle von kurzer Lebensdauer und beschreiben deren Eigenschaften mit hoher Genauig-

keit. Mit ihrer Hilfe ist es im Arbeitskreis des Autors gelungen, bislang unbekannte, lange gesuchte, aber auch recht kurzlebige Moleküle wie  $\text{FC}\equiv\text{CF}$ ,  $\text{H}_3\text{PF}_2$ ,  $\text{H}_2\text{PCl}$ ,  $\text{H}_3\text{SnCl}$  oder  $\text{F}_2\text{C}=\text{NH}$  zu charakterisieren, zu beschreiben und in ihrem Zerfallsschicksal zu verfolgen; ihre Synthesen konnten optimiert und ihre Molekülstrukturen durch genaue Atomabstände und Bindungswinkel beschrieben werden.

---

Prof. Dr. Hans Bürger  
Kruppstraße 230 · 42113 Wuppertal-Elberfeld



FRANZ RUDOLF KESSLER\*, Braunschweig

**Photoleitung und Excitonen\*\***

Braunschweig, 15. Mai 1992\*\*\*

**Kurzfassung:**

Nach einem Rückblick auf die Historie der Entdeckung des Phänomens der Photoleitung, das als „*experimentum crucis*“ für die Einordnung eines Festkörpers als „Halbleiter“ gilt, wird die Entwicklung der mikrophysikalischen Deutung dieses „inneren lichtelektrischen Effektes“ vorgestellt. Dabei spielen Gesichtspunkte wie Quantenausbeute, Löcherleitung im Valenzband und die Bildung eines Excitons eine besondere Rolle. Für die Photonenabsorption kann es bei der Überlagerung von Anregungsmechanismen beim optischen Interbandübergang zu einer „Verzweigung“ kommen, so daß bei der Bildung von Excitonen ein selektiver Quantenausbeutedefekt im Spektralverlauf der Photoleitung erscheint. Der Abbau des Excitonen-Anregungszustandes unterliegt seinerseits einer temperaturabhängigen „Verzweigung“. Die Vielfalt der darauf basierenden photoelektrischen Erscheinungen wird vorgestellt. Dabei spielt die Photoleitung im Magnetfeld („Magnetophotoleitung“) eine besondere Rolle, weil die Strukturierung der Bänder in Landau-Niveaus zu einem „oszillatorischen“ Photoleitungsspektrum führt, dessen (positive oder negative) Korrelation zur oszillatorischen Magnetoabsorption zahlreiche mikrophysikalische Parameter der Elektronenzustände im Halbleiter zu bestimmen gestattet.

**I. Einleitung und Geschichte der Photoleitung**

Unter Photoleitung, häufig auch als „Innerer lichtelektrischer Effekt“ bezeichnet, versteht man die Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit von Festkörpern unter der Einwirkung von Licht. In diesem Sinne wurde die Photoleitung 1873 von W. Smith in der Überseekabelstation Valentia/Irland entdeckt, als er einen hinreichend hochohmigen Vorwiderstand suchte, um die Überseekabel während der Verlegung auf ordnungsgemäße Funktion überprüfen zu können [1]. Statt eines umfangreichen und unhandlichen Drahtwiderstandes versuchte W. Smith den Einsatz eines relativ kurzen Stabes aus hexagonalem Selen. Er beobachtete dabei, daß sich der Widerstand dieses Selenstabes unter Lichteinwirkung verringerte.

Nach dem heutigen Verständnis der elektronischen Leitfähigkeit eines Festkörpers handelt es sich bei dem Element Selen in der hexagonalen kristallinen Modifikation um einen Halbleiter und bei der Photoleitung um eine Generation freier Ladungsträger

---

\* Univ.-Prof. em. Dr. F. R. Kessler · Am Krausberg 12 · 52351 Düren

\*\* Aus dem Institut für Halbleiterphysik und Optik der Technischen Universität Braunschweig.

\*\*\* Schriftform des am 15.5.1992 in Hannover vor der „Klasse für Naturwissenschaften und Mathematik“ der „Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft“ gehaltenen Vortrages.

durch Photonen in einem Ein-Quanten-Prozeß. Das heißt, daß die Photonenenergie bei der Photonenabsorption umgesetzt wird in die Anregung eines primär gebundenen Elektrons in einen freien, also im elektrischen Feld beweglichen Zustand, in dem es dann also durch seine „Driftbewegung“ Ladung transportiert. Diese optische Anregungsmöglichkeit zur Photoleitung ist heute ein „experimentum crucis“ zum Nachweis, daß ein Festkörper ein Halbleiter und kein Metall ist.

Die Photoleitung wurde sehr bald als ein physikalisch wichtiges Phänomen erkannt und als eine Quelle zahlreicher technischer Anwendungen richtig eingeschätzt. Die in der Anlage beigelegte Aufstellung zur „Geschichte der Photoleitung“ mag dem an Details Interessierten die entsprechenden Daten in die Hand geben.

Die vorliegenden Ausführungen greifen einen speziellen Aspekt der Photoleitung heraus, und zwar die Entwicklung des Verständnisses der Photoleitung im Zusammenhang mit dem Phänomen, daß die Photoleitung in der hier ausschließlich ins Auge gefaßten Form der „Eigenphotoleitung“ als optische Generation eines Elektron-Loch-Paares zu verstehen ist. Dabei ist das „Loch“ ein (nur quantenmechanisch interpretierbarer) freier Teilchenzustand, dem eine positive Elementarladung zuzuordnen ist. Insofern werden also bei dem Ein-Quanten-Prozeß durch ein Photon zwei(!) freie Ladungsträger produziert.

Da das negative Elektron und das positive Loch über die Coulombkraft miteinander wechselwirken und einen wasserstoffähnlichen Bindungszustand eingehen, d. h. ein sogenanntes „Exciton“ bilden, das elektrisch neutral ist, sollte eigentlich gar keine Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit unter Lichteinwirkung auftreten. Wie muß also unter diesen Aspekten Photoleitung verstanden werden?

Es wird sich zeigen, daß man zunächst die Existenz des Excitons gerade insofern durch Messung der Photoleitung nachweisen kann, als seine Generation unter bestimmten Bedingungen, und zwar speziell bei tiefen Temperaturen, zu einer Reduktion der Zahl der erzeugten freien Ladungsträger pro absorbiertem Photon führt (sogenannter „Quantenausbeutedefekt“). Zur Bestimmung der Quantenausbeute werden dabei die Strukturen in der Spektralfunktion der Photoleitung mit denen in der Absorption verglichen. Bei Excitonenbeteiligung erwartet man je nach Temperatur eine positive oder eine negative Korrelation zwischen den spektralen Selektivitäten in Absorption und Photoleitung.

Betrachtungen zum Einfluß von Excitonen auf die Photoleitung wurden schon relativ früh, d. h. in den 50-er Jahren, angestellt und entsprechende Experimente durchgeführt. Diese beziehen sich z. B. sowohl auf die direkte, als auch auf die indirekte Absorptionskante von Germanium (zur Unterscheidung beider Absorptionskanten vgl. weiter unten). J. Jaumann stellte diese frühen Ergebnisse u. a. in seinem 1958 gehaltenen Übersichtsreferat vor [14].

Das Korrelationsverhalten zwischen Absorption und Photoleitung wird noch signifikanter, wenn man die Photoleitung in einem äußeren Magnetfeld verfolgt, denn die Spektralfunktionen in Absorption und Photoleitung werden aufgrund der Landau-Niveau-Strukturierung des Leitungs- und Valenzbandes „oszillatorisch“. Die „Perio-



dizität“ kann dabei mit der Stärke des Magnetfeldes variiert werden, was die Signifikanz der Korrelationsfeststellung erhöht.

Die „oszillatorische Magnetophotoleitung“ ist damit ein sehr interessanter Teilaspekt der Photoleitung in Verbindung mit der Excitonenfrage. Darüber hinaus können auch andere Halbleiterparameter auf diese Weise bestimmt werden, z. B. die effektive Masse der freien Ladungsträger aus der entnehmbaren Zyklotronresonanzfrequenz. Die Messung der Photoleitungsspektren unter diesen Aspekten ist ein relativ „geschicktes“ Experiment, denn die Probe ist dabei ihr eigener Detektor und die Meßgröße fällt als reine Strom- oder Spannungsmessung an.

Technisch gesehen ist Photoleitung ein wichtiger Bestandteil der „Optoelektronik“ bzw. der Strahlungsmeßtechnik. Diese Anwendungen profitieren selbstverständlich von jeder Art Grundlagenkenntnis, die die Forschung vermittelt.

Als Beispielfall wird in der vorliegenden Arbeit zwar nur der Halbleiter Germanium vorgestellt, dies ist aber Orientierung genug, denn die Mechanismen sind bei allen Halbleitern mutatis mutandis die gleichen.

## II. Atomistische Primärerklärung der Photoleitung

Die Änderung der spezifischen Leitfähigkeit eines Festkörpers wird nach atomistischer Auffassung des Stromtransportes beschrieben durch entweder eine Erhöhung der Zahl der verfügbaren freien Ladungsträger pro Volumeneinheit oder durch die Erhöhung der Beweglichkeit der bereits im Dunkeln vorhandenen freien Ladungsträger. Prinzipiell wäre auch eine Kombination beider Effekte möglich. Diese Interpretation stützt sich auf die sich gegen Ende des 19. Jahrhunderts durchsetzende Erkenntnis, daß die Elektronen als Bestandteil der Atome durch ihre körperliche Bewegung den Ladungstransport durchführen.

Die „Beweglichkeit“ der Elektronen ist dabei die pro herrschender Feldstärke im Material aufgenommene Geschwindigkeit in Feldrichtung. Diese von außen provozierte Geschwindigkeit wird als „Driftgeschwindigkeit“ bezeichnet und damit von der thermisch bedingten „Wimmelbewegung“ unterschieden, die der Brownschen Molekularbewegung gleicht. Diese hat keinen Stromtransport im makroskopischen Sinne zur Folge, da sich im zeitlichen Mittel für ein Elektron, bzw. momentan für ein Ensemble von Elektronen, keine resultierende Ortsbewegung ergibt. Die Wimmelbewegung ist lediglich Ursache eines „Rauschens“ in der Spannung am stromlosen Widerstand („Widerstandsrauschen“).

Aufgrund dieser atomistisch-korpuskularen Vorstellung gilt für die spezifische Leitfähigkeit  $\sigma$  eines Materials durch Elektronen die Beziehung:

$$\sigma = e \cdot b \cdot N \quad (1)$$

mit:  $e$  = Betrag der Elementarladung =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  [Coulomb]

$b$  = Betrag der Beweglichkeit in [ $\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ ]

$N$  = Konzentration der freien Elektronen in [ $1/\text{m}^3$ ]

Schließt man eine durch Licht ausgelöste Beweglichkeitsänderung aus (vgl. den Hinweis im Kapitel VI. „Schlußbemerkungen“), so besteht „Photoleitung“, d. h. die

Erhöhung der spezifischen Leitfähigkeit um den Wert  $\Delta\sigma$ , aus der Steigerung der Konzentration der freien Ladungsträger um den Wert  $\Delta N$ , so daß gilt:

$$\Delta\sigma = e \cdot b \cdot \Delta N \quad (2)$$

Die speziellen Phänomene der Photoleitung, wie etwa die „negative Photoleitung“, d.h. die Erniedrigung des elektrischen Leitwertes eines Festkörpers unter Lichteinwirkung, oder die „persistierende Photoleitung“, d.h. das Bestehenbleiben einer Leitwerterhöhung auch nach Abschalten der Beleuchtung, können damit natürlich nicht erklärt werden. Diese Phänomene sind jedoch spezieller Natur und meist auf inhomogene Strukturen oder spezifisch präparierte Materialien beschränkt. Sie werden hier grundsätzlich außer Betracht gelassen.

Da die Bindung der Atome zu einem Halbleiter auf der Wechselwirkung der Elektronen der Elektronenhüllen der Atome beruht, die den „äußeren“ Bereich der Atome darstellen, liegt die Erklärung nahe, daß die Photoleitung auf der Freisetzung eines „äußeren“, aber zunächst in der Atombindung „festgelegten“, also „gebundenen“ Elektrons besteht. Die erforderliche Mindest-Freisetzungsenergie wird durch das Photon mit seiner Quantenenergie  $h\nu$  aufgebracht\*). Das Elektron wird damit von einem Anfangsenergiezustand  $E(1)$  auf den Energiezustand  $E(2)$  „angehoben“, in dem es frei beweglich ist. Ist die Energie des Photons größer als die Energiedifferenz  $E(2) - E(1)$ , so erhält das freie Elektron den Energieüberschuß als kinetische Energie  $E(\text{kin})$ . Es gilt also die Energiebilanz:

$$h\nu = E(2) - E(1) + E(\text{kin}) \quad (3)$$

In einer entsprechenden graphischen Darstellung auf der Energieskala als Ordinate (Abb. 1) ist demnach oberhalb des Energieniveaus  $E(2)$  ein Energiekontinuum darzustellen mit  $E(2)$  als Nullpunkt der kinetischen Energie  $E(\text{kin})$ .

Innerhalb dieses Energiekontinuums steigt das photoelektrisch freigesetzte Elektron dann nochmals zu höheren Energien auf, wenn es im elektrischen Feld zur Stromleitung eine Driftgeschwindigkeit und damit eine zusätzliche kinetische Energie erhält.

Da das Photon bei der energetischen Anhebung des Elektrons selbst absorbiert wird, besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Lichtabsorption und der Photoleitung. In diesem Zusammenhang wurde von Pohl und Mitarbeitern in den zwanziger Jahren in Göttingen der Begriff der „Quantenausbeute“ eingeführt. Die Quantenausbeute ist der Quotient aus der Zahl der erzeugten freien Elektronen und der Zahl der absorbierten Photonen in einem gegebenen Volumen. Im Sinne der Primärerklärung der Photoleitung ist demnach eine Quantenausbeute  $\eta = 1$  zu erwarten, wenn neben dem photoelektrisch wirksamen Wechselwirkungsprozeß zwischen Licht und Materie kein anderer Absorptionsmechanismus existiert. Tatsächlich haben Gudden und Pohl bei der Untersuchung der Photoleitung von Diamant (vgl. die Geschichtstabelle) dort eine Quantenausbeute von Eins bei der Bestrahlung mit Ultraviolettstrahlung gefunden.

\*)  $h$  = Plancksches Wirkungsquantum =  $4,13567 \cdot 10^{-15}$  eV/Hz

$\nu$  = Frequenz des Lichtes als elektro-magnetische Welle (in Hz)

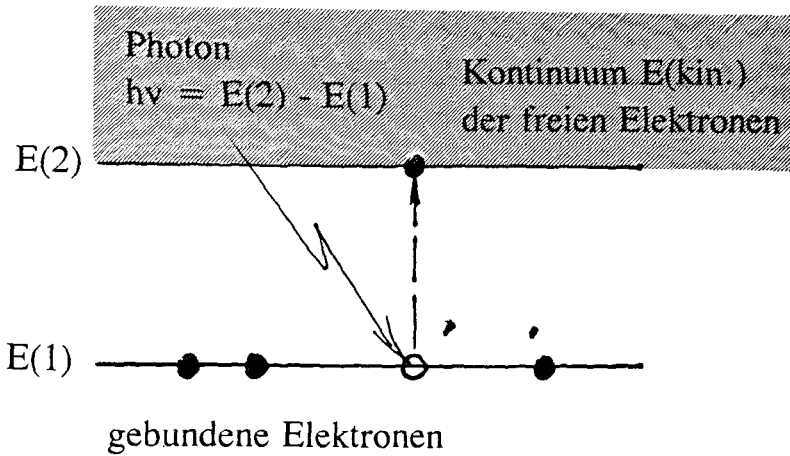


Abb. 1:  
 Skizze zur Primärerklärung der Photoleitung in Halbleitern  
 (zur Erläuterung siehe Text).

Bei bestehender zusätzlicher Absorption muß demnach die photoelektrische Quantenausbeute zwischen Null und Eins liegen, denn ein entsprechender Teil der absorbierten Photonen bleibt in diesem Fall in Bezug auf die Photoleitung unwirksam.

Auf den tatsächlich beobachtbaren Fall einer Quantenausbeute größer Eins soll hier nicht näher eingegangen werden, denn dieser tritt nur dann auf, wenn die Photonenenergie größer ist als der zweifache Wert von  $E(2) - E(1)$ . In diesem Fall kann ein erstes photoelektrisches Elektron dank seiner kinetischen Energie in Folge eines abbremsenden Stoßes mit einem gebundenen Elektron ein weiteres Elektron freisetzen („Impact-Ionisation“ bei der „Thermalisierung“).

Nach Abschalten der Bestrahlung verschwindet die Photoleitung in einem zeitlichen Abklingprozeß, der in der Regel exponentiell verläuft. Die entsprechende Relaxationszeit (gleich der Zeit für den Abfall auf  $1/2, 72 \dots$  des anfänglichen Ausgangswertes) wird in anthropomorpher Weise häufig auch als „Lebensdauer“ der freien, optisch generierten Elektronen bezeichnet. Dieses Abklingen der zusätzlichen spezifischen Leitfähigkeit auf Null in endlicher Zeit ist eine Folge der Rückkehr der freien Elektronen in den ursprünglichen gebundenen Zustand in einem statistisch ablaufenden Prozeß des „Wieder-eingefangen-werdens“ in den stabileren Bindungszustand im Festkörperverband.

Dieser als „Rekombination“ zu bezeichnende Prozeß findet ständig mit einer bestimmten, zur Konzentrationserhöhung  $\Delta N$  proportionalen Rate statt („Rekombinationsrate“ in der Dimension  $[1/(\text{m}^3 \cdot \text{sec})]$ ) auch während des optischen Generationsprozesses durch die Bestrahlung (entsprechend einer analogen optischen „Generationsrate“). Insofern ist die zusätzliche Konzentration freier Elektronen  $\Delta N$  immer nur diejenige Größe der „Überschußträgerkonzentration“, die sich im stationären Gleichgewichtsfall zwischen Generation und Rekombination einstellt.

Die praktisch vorliegenden Lebensdauern variieren je nach Material und Kristallperfektion um mehrere Größenordnungen. Als ein guter Richtwert erscheint die Lebensdauer in hochreinem Germanium von ca.  $1\text{E-4}$  [sec] bei Zimmertemperatur. Verunreinigungen und Strukturstörungen reduzieren die Lebensdauer etwa proportional zu ihrer Konzentration.

### III. Eigenphotoleitung und Generation von Elektron-Loch-Paaren

Die moderne Interpretation der Photoleitung der Halbleiter basiert nicht mehr auf dem klassisch-korpuskularen Bild der inneren Freisetzung zunächst lokalisierter Elektronen, sondern verwendet die Beschreibung des Elektrons im Wellenbild, d.h. sie stellt das Elektron als „Materialwelle“ im Sinne de Broglies dar.

Die für die vorliegenden Betrachtungen wichtigste Konsequenz ist die Tatsache, daß auch die gebundenen Elektronen eines Halbleiters ein (begrenztes) Energiekontinuum bevölkern. So erweitert sich das Ausgangsenergieniveau  $E(1)$  zu einem „Valenzband“ (vgl. Abb. 2). Im Valenzband eines Halbleiters bei hinreichend tiefen Temperaturen besteht jedoch nicht die Möglichkeit der Energieerhöhung durch einzelne Elektronen, also kann auch keine Driftgeschwindigkeit im elektrischen Feld aufgenommen werden, und es entfällt eine entsprechende Berücksichtigung in der Darstellung der spezifischen Leitfähigkeit gemäß Gl. (1):

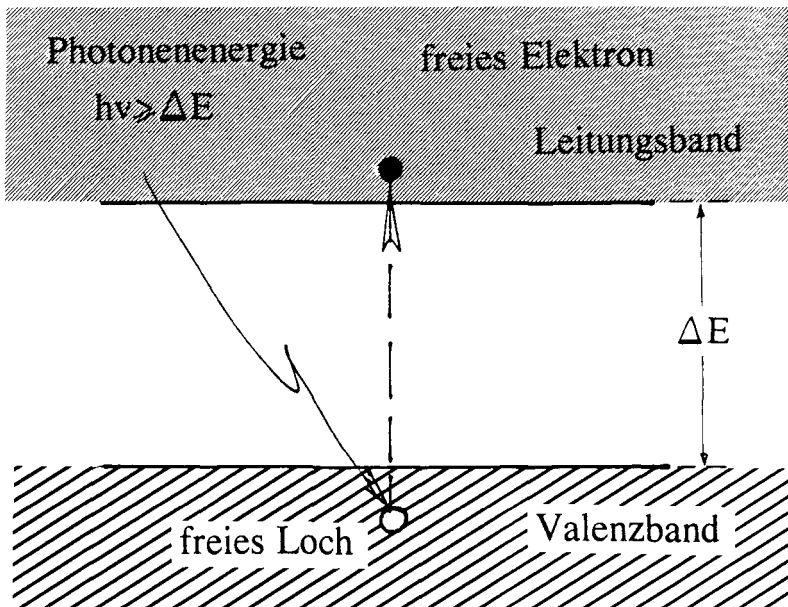


Abb. 2:

Skizze zur Eigenphotoleitung eines Halbleiters als optische Anregung eines Elektrons aus dem Valenzband (dort entsteht ein „Loch“) in das Leitungsband.

Ursache dieser Unbeweglichkeit ist die diskrete Struktur eines Valenzbandes in der Form bestimmter Quantenzustände. Die wiederum können nach Aussage des „Pauli-Prinzips“ nur jeweils von einem einzigen Elektron eingenommen werden. Da im Valenzband die Zahl der Quantenzustände genau gleich ist der Zahl der Elektronen, die zur Besetzung bereitstehen, ist das Valenzband genau voll besetzt\*) und jedes Elektron „blockiert“, was eine Aufnahme von kinetischer Energie im elektrischen Feld angeht.

Wird durch die Photonenanregung jedoch ein Elektron aus dem Valenzband in den freien Zustand im darüber befindlichen „Leitungsband“ versetzt, so entsteht auch im Valenzband Bewegungsmöglichkeit. Die Beschreibung der dann möglichen vielfältigen energetischen Umordnungen gelingt leichter in einer Betrachtungsumkehr: Der freie Platz verhält sich so wie ein positives(!) Elektron und gilt damit als eigenständiger freier Ladungsträger. Die Bezeichnung als „Loch“ (engl.: hole) ist üblich und entspricht der Beschreibung einer in Wasser aufsteigenden Luftblase, mit der es uns geläufigerweise ebenso leichter ist, die tatsächlich herabfließende Wasserbewegung zu erfassen.

Die Existenz der elektrischen Stromleitung durch „Löcher“ und deren positives Ladungsvorzeichen sind inzwischen in vielfältiger Weise experimentell nachgewiesen worden. Die Bewegung eines Loches im elektrischen Feld beruht letztlich auf der Delokalisierung der gebundenen Elektronen im Sinne der Ausbreitung von Wellen.

Mit der Photonenabsorption und Produktion eines freien Elektrons ist also immer auch die Produktion eines Loches als weiterem freien Ladungsträger verbunden. In Konsequenz dieser Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares durch ein Photon ist die Erhöhung der spezifischen Leitfähigkeit zu schreiben in der Form

$$\Delta\sigma = e[b(n) + b(p)] \cdot \Delta N \quad (4)$$

(Indizierung „n“ = „negativ“ für Elektronen, bzw. „p“ = „positiv“ für Löcher)

Dabei ist berücksichtigt, daß stets gilt

$$\Delta N(n) = \Delta N(p) = \Delta N, \quad (5)$$

aber das Loch generell eine andere Beweglichkeit  $b(p)$  besitzt als das Elektron  $b(n)$ .

Die Definition der Quantenausbeute bezieht sich dementsprechend auf die Produktion eines Elektron-Loch-Paares.

Abb. 3 zeigt eine frühe Messung der Quantenausbeute von Germanium bei Zimmertemperatur [2]. Der dargestellte Spektralbereich erfaßt die Photoleitung von der Einsatzschwelle bei ca.  $2,0 \mu\text{m}$  Wellenlänge an bis zu  $1,0 \mu\text{m}$  Wellenlänge entsprechend  $0,62 \text{ eV}$  bis  $1,24 \text{ eV}$  Photonenenergie. Die Anregung der Elektronen erfolgt dabei aus dem Valenzband im sogenannten indirekten Übergang auf der niederenergetischen Seite und im direkten Übergang auf der höherenergetischen Seite (zur Diskussion dieser beiden unterschiedlichen Übergangsarten und der dabei jeweils unterschiedlichen Schwellenenergie für die Photonen vgl. weiter unten). Im gesamten Spektralbereich liegt die Quantenausbeute nahe bei Eins.

\*) Mit der Voraussetzung „hinreichend tiefer Temperatur“, d.h.  $kT \ll \Delta E$ , sei eine rein thermische Elektronenanregung im Leitungsband ausgeschlossen.

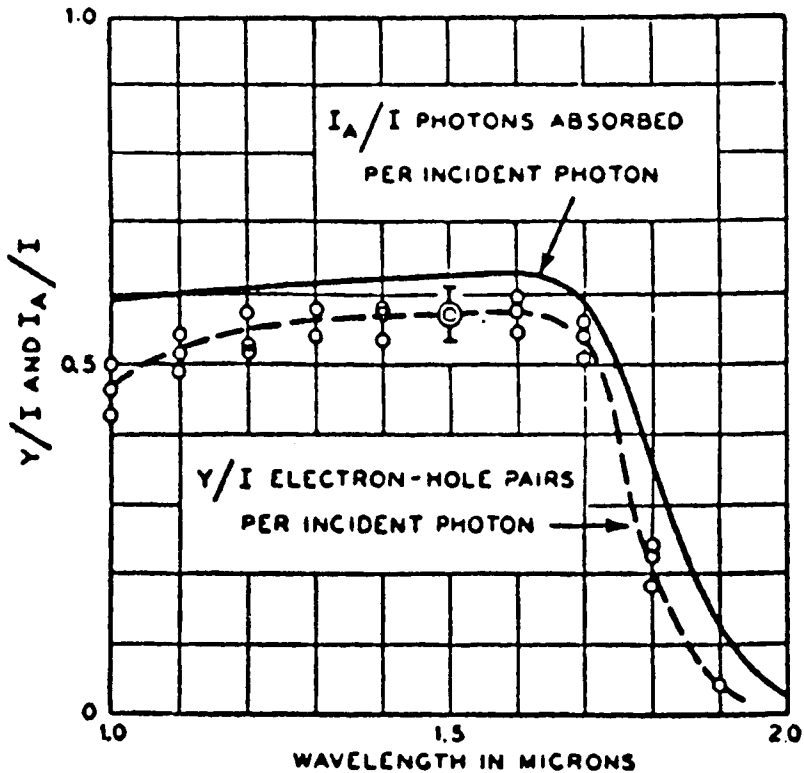


Abb. 3:

Spektralverlauf der Zahl der absorbierten Photonen (—) und der generierten Elektron-Loch-Paare (---) pro einfallendem Photon in Germanium bei der Temperatur 300 Kelvin als Funktion der Wellenlänge in  $\mu\text{m}$ .

Nach F.S. Goucher [2].

Der Abbau der Photoleitung nach Abschalten der Bestrahlung ist nunmehr als eine Rekombination eines freien Elektrons mit einem Loch aufzufassen. Als Folge der wellenmechanischen Delokalisierung und Ununterscheidbarkeit der Elektronen und Löcher kann diese „Elektron-Loch-Paar-Rekombination“ an jeder Stelle in beliebiger Kombination erfolgen, d. h. ohne Bezug auf die ursprüngliche partnerschaftliche Generation.

Der hier ins Auge gefaßte Photoleitungsmechanismus mit der Produktion jeweils eines Elektron-Loch-Paares pro absorbiertem Photon ist dem Halbleitermaterial eigentümlich, d. h. er ist primär unabhängig von (kleineren) Strukturstörungen und/oder Verunreinigungsgraden. Er wird deshalb auch als „Eigenphotoleitung“ („intrinsic photoconductivity“) bezeichnet.

Die den Einsatz der Photoleitung begleitende Absorption ist durch einen relativ scharfen Einsatz bei  $h\nu = \Delta E$  gekennzeichnet („Absorptionskante“), wobei  $\Delta E$  der energetisch minimale Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband ist. Die spektrale

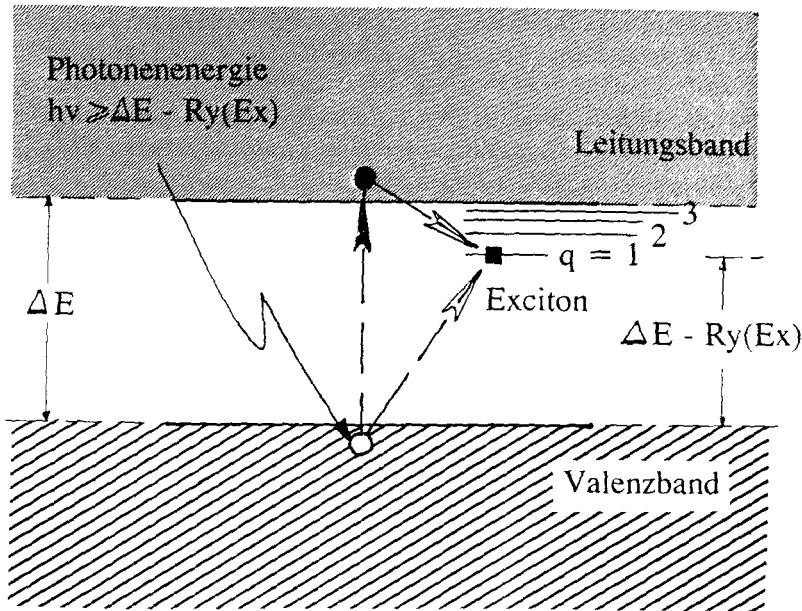


Abb. 4:

Skizze zur Erläuterung der energetischen Lage der Excitonenniveaus in der Bandlücke eines Halbleiters und der Entstehung eines Excitons aus der Bindung eines freien Elektrons an ein Loch.

Lage dieser Absorptionskante ist eines der materialtypischen Merkmale eines Halbleiters.

Neben der Eigenphotoleitung existiert in dotierten (oder verunreinigten) Halbleitern noch eine sogenannte Störstellenphotoleitung, bei der das Photon von einer „Störstelle“ (Fremdatom oder Strukturstörung) ein Elektron ablöst oder dort die Aufnahme eines Elektrons aus dem Valenzband bewirkt. Die Störstelle ist zwar dann ionisiert, bleibt aber ortsfest und damit ohne Einfluß auf die spezifische Leitfähigkeit. So entsteht eine „unipolare“ Photoleitfähigkeit, bei der entweder freie Elektronen oder Löcher auftreten. Die Störstelle wird entsprechend als „Donator“ oder „Akzeptor“ bezeichnet.

Die Photonenmindestenergien für diese Störstellenphotoleitung liegen im allgemeinen zwischen 0,01 eV und 0,1 eV. Dieser Spektralbereich fällt deshalb im allgemeinen nicht mit dem der Eigenphotoleitung zusammen. – Die Störstellenphotoleitung wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter diskutiert.

#### IV. Excitonen

Die Existenz von freien Elektronen und Löchern unterschiedlichen Ladungsvorzeichens nebeneinander kann nicht ohne die anziehende Wirkung betrachtet werden, die im Sinne der Coulombkraft zwischen zwei punktförmigen heteropolaren Ladungen besteht. Diese Situation entspricht der Wechselwirkung zwischen einem Elektron und

einem Proton genau. Dort entsteht ein gebundener Zustand in der Form des Wasserstoffatoms. Der in analoger Weise entstehende gebundene Zustand zwischen Elektron und Loch ist das „Exciton“ [7]. Es ist ein neues, nach außen neutrales Teilchen, das in seinen diskreten Energiezuständen „Wasserstoffähnlichkeit“ besitzt. Allein die Quantitäten sind geändert, da die träge Löchermasse nur etwa der trägen Masse eines Elektrons entspricht und damit ca. 1835-mal kleiner ist als die träge Masse des Protons. Das Exciton hat dementsprechend eine kleinere Rydbergkonstante  $Ry(Ex)$ , d.h. Ionisierungsenergie. Die Energiezustände des Excitons lassen sich damit als Funktion der Hauptquantenzahl  $q$  in der bekannten Form schreiben:

$$E(q) = -Ry(Ex) \cdot \frac{1}{q^2} \quad (6)$$

Bezieht man  $Ry(Ex)$  auf die Rydbergkonstante des Wasserstoffatoms  $Ry(H) = 13,6 \text{ eV}$ , so läßt sich in guter Näherung  $Ry(Ex)$  wie folgt berechnen:

$$Ry(Ex) = Ry(H) \cdot m(\text{red})/\epsilon_{\text{rel}}^2 \quad (7)$$

$m(\text{red})$  ist dabei die aus den trägen Massen von Elektron  $m(n)$  und Loch  $m(p)$  gebildete reduzierte träge Masse des Excitons:

$$1/m(\text{red}) = 1/m(n) + 1/m(p) \quad (8)$$

Ferner ist  $\epsilon_{\text{rel}}$  die relative statische Dielektrizitätskonstante des betrachteten Halbleiters.

Befindet sich das Exciton im Grundzustand mit der Hauptquantenzahl  $q = 1$ , so ist bei seiner Entstehung die Bindungsenergie  $Ry(Ex)$  freigesetzt worden. Für den Quantenprozeß der Elektron-Loch-Paar-Generation mit „gleichzeitiger“ Excitonenbildung bedeutet dies jedoch, daß die erforderliche Photonenenergie schon von vornherein um den Betrag  $Ry(Ex)$  kleiner sein kann als  $\Delta E$ , d.h. der Bandabstand. In einem zu Abb. 2 analogen „Bändermodell“ (vgl. Abb. 3) ist folgerichtig der Excitonengrundzustand um den Betrag  $Ry(Ex)$  unterhalb des Leitungsbandes einzutragen.

Die entsprechenden optischen Absorptionsprozesse zur Bildung von Excitonen beginnen also bereits bei der Mindestphotonenenergie:

$$h\nu(\text{min}) = \Delta E - Ry(Ex) \quad (9)$$

Entsprechend der scharfen Energieniveausituation tritt die Absorption dabei nur in der Form einer relativ schmalen Absorptionslinie im Spektrum auf.

Da auch Bildungsprozesse direkt in Excitonenzustände anderer Quantenzahlen stattfinden können, ist das Absorptionsspektrum im Bereich vor der Absorptionskante entsprechend linienhaft strukturiert (siehe Abb. 5 als schematische Skizze). Die erste Excitonenabsorptionslinie mit  $q = 1$  ist dabei am ausgeprägtesten, während die anderen Linien mit wachsenden Hauptquantenzahlen des Excitons schwächer werden und in wachsendem Maße ineinanderfließen, da ja die Abstände nach Gl. (6) immer enger werden.

Bei Photonenenergien  $h\nu \geq \Delta E$  werden die Excitonen direkt ionisiert, so daß sich ein Absorptionskontinuum anschließt, daß dem der früheren Absorptionskante ähnelt,



## Absorption bzw. Photoleitung

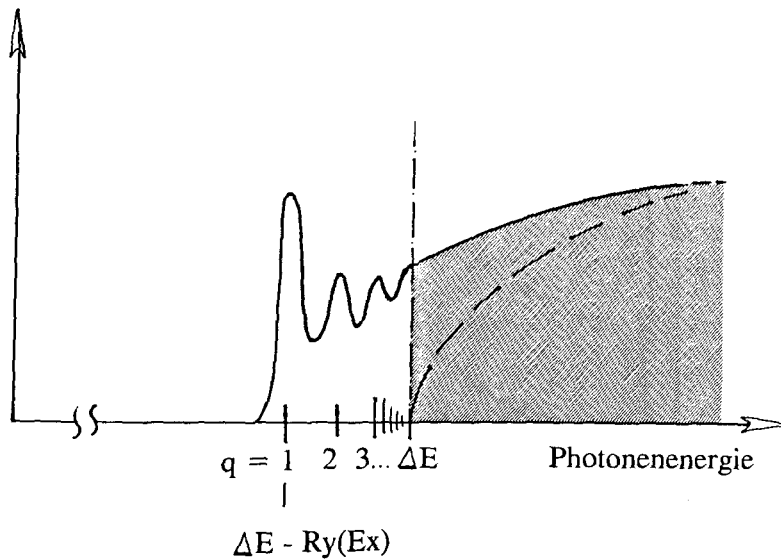


Abb. 5:

Skizze zum Spektralverlauf der Absorption und der Photoleitung im Bereich der Absorptionskante eines Halbleiters: a) Absorption und Photoleitung ohne Berücksichtigung von Excitonen (----);

b) Absorption und Photoleitung im Fall der Excitonengeneration:

Absorptionsverlauf bei  $kT \ll Ry(Ex)$  (—). Der Teil der Spektralfunktion mit auftretender Photoleitung ist dabei mit Schraffur unterlegt. Bei  $kT \gg Ry(Ex)$ , d. h. thermischer Dissoziation der Excitonen, folgt die Photoleitung in positiver Korrelation der Absorption (—).

aber mit höheren Werten beginnt. Hierin macht sich die verbleibende Coulomb-Wechselwirkung zwischen den nunmehr freien Bestandteilen des Excitons, dem freien Elektron und Loch, doch noch bemerkbar.

Die Ionisierungsenergie  $Ry(Ex)$  der Excitonen ist relativ klein im Vergleich zum Bandabstand  $\Delta E$ . Sie beträgt, berechnet mit typischen Werten nach Gl. (7), nur einige meV. Dann aber kann bereits die durch das Produkt  $k \cdot T$  ( $k$  = Boltzmann-Konstante;  $T$  = absolute Temperatur) repräsentierte thermische Quantenenergie so groß sein, daß die Excitonen zwar durch optische Anregung erzeugt, aber sofort thermisch ionisiert, d. h. dissoziiert werden. Dadurch und durch die thermisch bedingte Energieniveaueverbreiterung reduzieren sich die charakteristischen Excitonenabsorptionslinien zu einer „verschliffenen“ Absorptionskante, so daß die Excitonenanregung bei wachsender Temperatur nicht mehr signifikant verfolgt werden kann.

Abb. 6 zeigt eine Messung des Absorptionsspektrums von Germanium bei verschiedenen Temperaturen [3]. Man erkennt deutlich bei tiefen Temperaturen die prominente Excitonenabsorptionslinie zur Excitonenanregung direkt in den Quantenzustand  $q = 1$ .

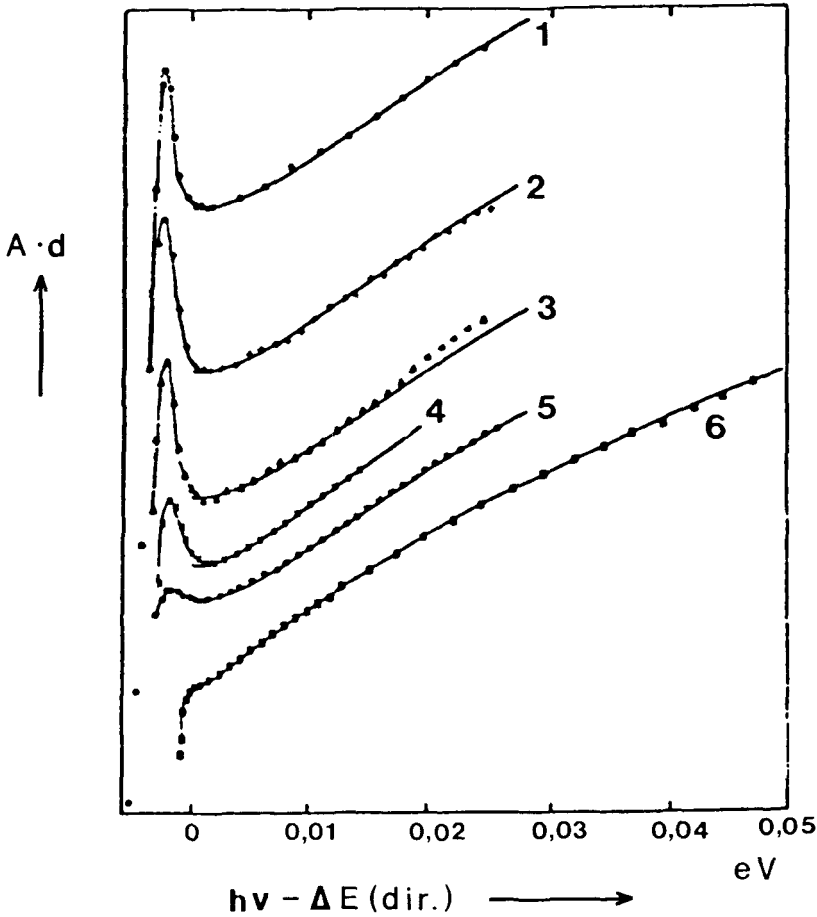


Abb. 6:

Absorptionsspektrum von Germanium im Bereich der direkten Absorptionskante bei Temperaturen zwischen 20 K und 291 K. Aufgetragen ist das Produkt aus Absorptionskoeffizient  $A$  und Proben-dicke  $d$  als Funktion des Abstandes der Photonenenergie  $h\nu$  vom jeweiligen Bandabstand  $\Delta E(\text{dir.})$  (jeweils in eV).

Zuordnung der Kurven-Nr. zum Temperaturwert mit Angabe der Größe von  $\Delta E(\text{dir.})$  bei dieser Temperatur: 1: 20 K, 0,8892 eV; 2: 77 K, 0,8832 eV; 3: 90 K, 0,8807 eV; 4: 195 K, 0,8455 eV; 5: 249 K, 0,8247 eV; 6: 291 K, 0,8059 eV.

Nach G. G. MacFarlane et al. [3].

Die Excitonen als neutrale Teilchen sind auch unmittelbar als Träger ihrer Anregungsenergie [ $\Delta E - R_y(\text{Ex})$ ] nachgewiesen worden. Sie transportieren z.B. durch ihre thermische Diffusion diese Energie durch den Festkörper in Konkurrenz etwa zu normalen Wärmeleitungsvorgängen. – Aus der korpuskularen Trägerschaft von Anregungs-

energie durch das Exciton resultiert übrigens auch seine Namensgebung (excitare = (lat.) anregen).

Die Excitonen werden nach Abschalten der Bestrahlung wiederum durch Rekombination abgebaut. Die Rekombination noch unmittelbar im Excitonenzustand bedeutet, daß niemals freie Ladungsträger auftreten. Das Elektron verschwindet gewissermaßen im beigelegten freien Platz im Valenzband. Dabei wird die im Excitonenzustand gespeicherte Anregungsenergie in Form von äquivalenten Photonen abgestrahlt. Man kann diese Lumineszenzstrahlung, die ein zum Linien-Absorptionsspektrum analoges Linien-Emissionsspektrum besitzt, leicht spektroskopisch nachweisen. Gerade anhand dieser Lumineszenzstrahlung ist es möglich, die Diffusion der Excitonen experimentell zu verfolgen.

Die Excitonenrekombination erfolgt zeitlich gesehen im allgemeinen wieder in exponentieller Form.

### V. Einfluß der Excitonen auf die Photoleitung

Da die Elektronen und Löcher bei tiefen Temperaturen, d.h. bei  $kT \ll Ry(Ex)$ , und bei Photonenenergien  $h\nu$  in der Relation:

$$\Delta E - Ry(Ex) \leq h\nu \leq \Delta E \quad (10)$$

nach ihrer photoelektrischen Generation allesamt zu Excitonen paarweise gebunden sind und das Exciton elektrisch neutral ist, tritt gar keine Photoleitung auf, bzw. die photoelektrische Quantenausbeute ist gleich Null.

Bei steigenden Temperaturen setzt jedoch eine statistisch wachsende thermische Ionisierung der Excitonen ein, so daß die Quantenausbeute kontinuierlich steigt und schließlich den Wert Eins erreicht, wenn sich die Wahrscheinlichkeit der thermischen Ionisation dem Wert Eins nähert.

Während also bei tiefen Temperaturen im Bereich der linienhaften Absorption zur Excitonenproduktion die Photoleitung Null bleibt, tritt bei höheren Temperaturen eine positive Korrelation der Photoleitung bzw. Quantenausbeute zu dem strukturierten Absorptionsspektrum in diesem Spektralbereich auf.

Für Photonenenergien  $h\nu \geq \Delta E$ , also im Bereich der früher diskutierten Absorptionskante, ist jedoch Photoleitung in jedem Fall positiv mit der Absorption korreliert, da die Excitonen schon vom Erzeugungsprozeß her gesehen dissoziiert sind. Die Quantenausbeute bleibt jedoch bei tieferen Temperaturen kleiner als Eins, da ein Teil der zunächst freien Elektronen und Löcher nach ihrer Thermalisierung in den gebundenen Excitonenzustand übergehen, bevor sie als freie Ladungsträger rekombinieren. Sie sind damit für die Stromleitung nur in geringerem Maße verfügbar. Mangels thermischer Dissoziation bei tiefen Temperaturen rekombinieren die Excitonen dann unmittelbar in sich.

Abb. 5 weist auf diese spektralen Verhältnisse der Photoleitung hin, und zwar für einerseits  $kT \ll Ry(Ex)$  und andererseits  $kT \gg Ry(Ex)$ .

Im Absorptionsbereich der Excitonenproduktion kann in der Photoleitung außer spektraler Strukturlosigkeit (bei tiefen Temperaturen) oder positiver Korrelation zu

dem Linienspektrum der Excitonenanregung (bei höheren Temperaturen) auch der Fall einer negativen Korrelation auftreten. Dies ist dann der Fall, wenn es sich an der betrachteten spektralen Stelle um einen Interbandübergang handelt, dem ein anderer Interbandübergang mit kleinerem Bandabstand, also mit kleineren Photonenenergien überwindbar, vorgelagert ist.

Diese Verhältnisse liegen immer dann vor, wenn der absolut minimale Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband ein sogenannter „indirekter“ ist. Das ist bezüglich der Elektronenanregung eine Situation, bei der für das aus dem Valenzband angehobene Elektron eine Impulsänderung erforderlich ist, die den Impuls des Photons

$$\text{Impuls des Photons } I(\text{Ph}) = h\nu/c \quad (10)$$

mit:  $c$  = Vakuumlichtgeschwindigkeit

übersteigt.

In diesem Fall erfolgt der Übergang unter Mitwirkung eines Phonons, d.h. eines Schallquants, dessen Impuls ausreichend groß ist. Solche Interbandanregungen als „Dreierstoß“ sind von geringerer Wahrscheinlichkeit, der entsprechende optische Absorptionskoeffizient also vergleichsweise kleiner als beim „Zweierstoß“, d.h. bei der sogenannten „direkten“ Interbandanregung.

Bei diesen Halbleitern, und sowohl Germanium als auch Silizium zählen dazu, beginnt die Absorptionskante mit einem schwächeren indirekten Interbandübergang, dem ein stärkerer direkter Interbandübergang folgt. Die Absorptionskante verläuft damit „zweistufig“, wie Abb. 7 für Germanium zeigt [4].

Den beiden Einsatzschwellen  $\Delta E(1)$  und  $\Delta E(2)$  vorgelagert sind die jeweils zugehörigen Excitonenzustände [3], [11]. Betrachtet man nun den Spektralbereich bei  $h\nu \approx \Delta E(2) > \Delta E(1)$ , so besteht durch die Photoleitungsanregung bei  $\Delta E(1)$  an dieser Stelle bereits ein „Untergrund“ von  $\Delta \sigma(1)$ , zu dem eine Leitfähigkeitsänderung  $\Delta \sigma(2)$  hinzutritt, wenn die Photonenenergie den Wert  $[\Delta E(2) - R_y(\text{Ex}2)]$  überschreitet.

Die obigen Betrachtungen über die Photoleitung bei Excitonenproduktion bei der direkten Interbandanregung sind nunmehr entsprechend zu erweitern (vgl. Abb. 8):

- a) Bei hohen Temperaturen bleibt es bei der positiven Korrelation.
- b) Bei tiefen Temperaturen jedoch tritt nunmehr eine negative Korrelation zwischen dem Photoleitungs- und Absorptionsspektrum auf: Diejenigen Photonen nämlich, die am direkten Übergang absorbiert werden unter Excitonenprodukten, bleiben photoelektrisch unwirksam. Damit ist aber dort ein Teil der Photonen mit der Quantenausbeute Null „verbraucht“ worden, dementsprechend muß die Gesamtquantenausbeute genau an denjenigen spektralen Stellen selektiv sinken, an denen die Linienabsorption infolge Excitonenproduktion steigt.
- c) Bei mittleren Temperaturen, also etwa bei  $k \cdot T = R_y(\text{Ex}2)$  findet sich ein Übergang von der negativen zur positiven Korrelation und damit dort ein strukturloses Photoleitungsspektrum, da die Excitonen etwa zu 50% thermisch ionisiert werden, also etwa hälftig doch freie Ladungsträger entstehen.

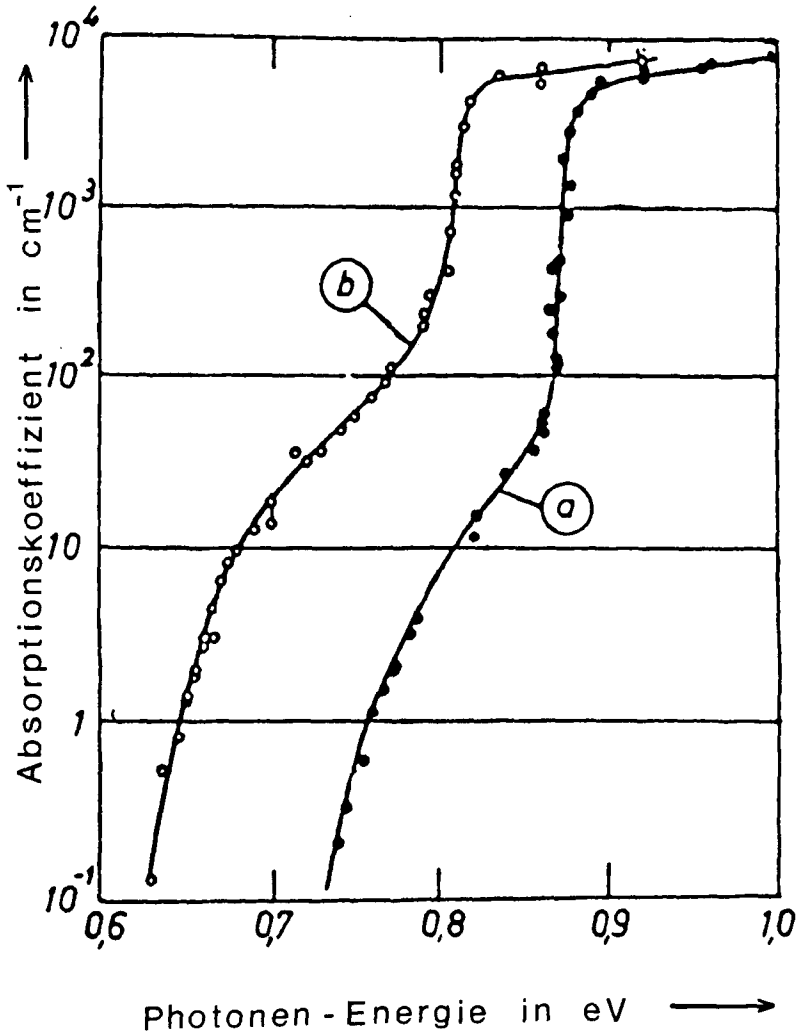


Abb. 7:

Absorptionsspektrum von Germanium im Spektralbereich der indirekten und direkten Interbandanregung bei a) 77 K und b) 300 K. Aufgetragen ist der Logarithmus des Absorptionskoeffizienten als Funktion der Photonenenergie. Die indirekte Absorptionskante erscheint als der steile Anstieg bei den kleineren, die direkte bei den höheren Photonenenergien.

Nach W. C. Dash und R. Newman [4].

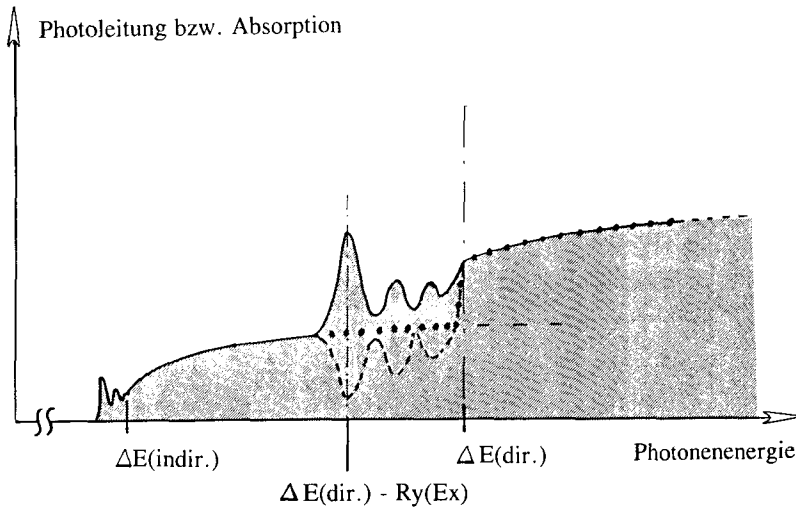


Abb. 8:

Skizze zur Erläuterung der Korrelation zwischen Photoleitung und Absorption im Bereich der direkten Interbandanregung bei Excitongeneration. Vorausgesetzt ist die Existenz einer indirekten optischen Interbandanregung bei kleineren Photonenenergien: Photoleitung a) bei  $kT \ll Ry(Ex)$  (----), b) bei  $kT \approx Ry(Ex)$  (.....) und c) bei  $kT \gg Ry(Ex)$  (——). Der Absorptionsverlauf ist mit Schraffur unterlegt.

Abb. 9 zeigt für Germanium bei tiefen Temperaturen in einem spektralen Ausschnitt im Bereich des direkten Interbandüberganges den Vergleich zwischen dem Absorptionsverlauf und dem Photoleitungsspektrum [5]. Man erkennt sehr schön das Photoleitungsminimum und damit den „Defekt“ in der Quantenausbeute, wenn das „direkte Exciton“ in den Zustand  $q = 1$  gebildet wird.

Damit ist es also gelungen, das trotz ansteigender Absorption auftretende selektive Defizit in der Quantenausbeute der Photoleitung durch die Heranziehung von Excitonen-Mechanismen zu deuten.

Die Feststellung einer positiven Korrelation zu Excitonenanregungen ist dagegen weniger deutlich, da, wie oben ausgeführt, bei den notwendigerweise höheren Temperaturen die Excitonen-selektivitäten bereits mehr oder weniger „eingeebnet“ sind (vgl. dazu nochmals Abb. 6).

Es ist allerdings zu bemerken, daß es generell relativ unsicher ist, eine einzeln auftretende Photoleitungsselektivität in der Absorptionskante eindeutig zuzuordnen. Denkbare Ursachen könnten dazu Oberflächeneffekte oder Störstellenzustände in der energetischen Bandlücke sein. Ursache einer negativen Korrelation zwischen Photoleitung und Absorption kann auch einfach eine falsch gewählte Probendicke sein [6]. Abhilfe in Bezug auf eine gesicherte Excitonen-zuordnung kann jedoch die Analyse der „oszillatorischen Magnetophotoleitung“ bringen, der der nächste Abschnitt gewidmet ist.

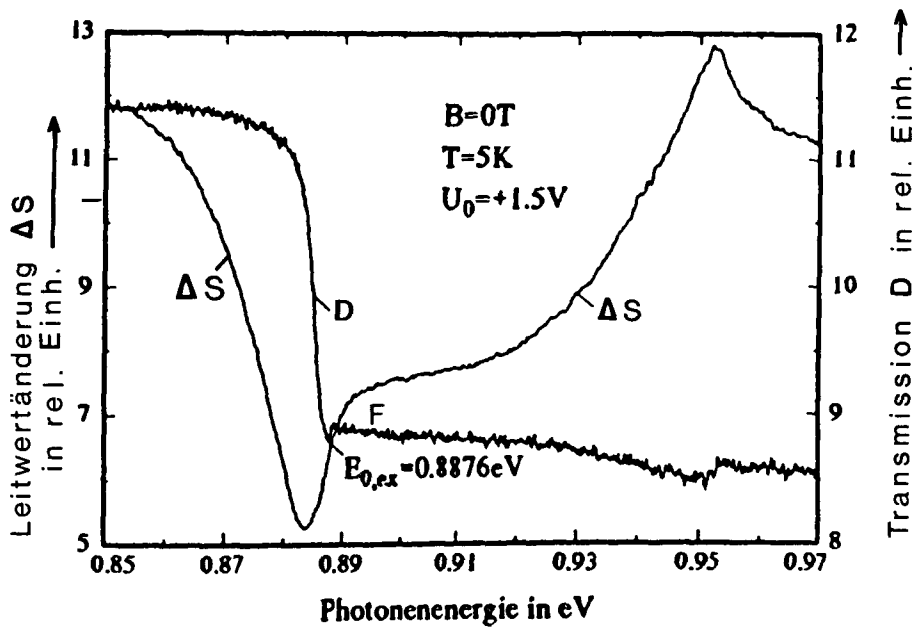


Abb. 9:

Spektrum der Durchlässigkeit  $D$  und der Leitwertänderung  $\Delta S$  im Bereich der direkten Absorptionskante von Germanium (Probendicke  $8 \mu\text{m}$ ) bei der Temperatur 5 Kelvin. Der bei 0,883 eV Photonenenergie erscheinende Quantenausbeutedefekt in der Leitwertänderung (selektives Minimum dort) wird der Excitongeneration zugeordnet.

Nach F. R. Keßler und C. Wittchen [5].

## VI. Magnetophotoleitung und Excitonen

Der spektrale Verlauf von Absorption und Photoleitung für  $h\nu > \Delta E$  ist in seinem kontinuierlichen Verlauf von der Einsatzkante an wesentlich geprägt durch den ebenso kontinuierlichen Verlauf der Zustandsdichten in Valenzband und Leitungsband. Der Begriff „Zustandsdichte“ bezeichnet hier die Konzentration der möglichen Quantenzustände pro Energieintervall. Die kontinuierlich verlaufende Zustandsdichte ist es auch, die zu der Berechtigung führt, die Bänder in Abb. 2 und 3 als „Kontinua“ zu bezeichnen.

Einfachen, aber grundsätzlichen theoretischen Rechnungen nach wächst die Zustandsdichte  $D(E)$  eines Bandes wie folgt mit dem energetischen Abstand vom Bandrand  $E(1)$  bzw.  $E(2)$  (vgl. Abb. 10 für  $B = 0$  und  $E \geq E(2)$ ):

$$D(E) \sim \sqrt{|E - E(1,2)|}; \quad E \leq E(1), \quad E \geq E(2) \quad (11)$$

Setzt man den Halbleiter einem Magnetfeld aus, so ändert sich der Verlauf der Zustandsdichte dramatisch: Das Energiekontinuum spaltet in sogenannten Landau-Niveaus auf, die sich in periodischen Abständen, charakterisiert durch die Landau-Quantenzahl „L“ wiederholen. Die Zustandsdichte verläuft dann in „Sägezahnform“ mit jeweils einer Singularität bei  $E - E(L) = 0$  (siehe Abb. 10). Für die Energie des Landau-Niveaus  $E(L)$  gilt dabei (hier für freie Elektronen im Leitungsband angegeben, die Verhältnisse im Valenzband für Löcher sind analog):

$$E(n, L) = E(2) + \hbar \cdot e \cdot B \cdot (0,5 + L) / m(n) \quad (12)$$

mit:  $B$  = magnetische Induktion

$$L = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\hbar = h/2\pi$$

Die entsprechende Zustandsdichte im Leitungsband hat die Energieabhängigkeit

$$D(n, E, B \neq 0) \sim \sum_L 1/[E - E(n, L)]^{1/2} \quad (13)$$

mit jeweils  $E > E(L)$  für jedes  $L$ .

Da die optischen Übergänge bei zur Lichteinstrahlungsrichtung parallelem Magnetfeld (sogenannte „Faraday-Konfiguration“, die im folgenden als existent vorausgesetzt ist) ohne Änderung der Quantenzahl „L“ vom Valenzband ins Leitungsband führen, ist das Absorptionsspektrum „oszillatorisch“ moduliert [12]. Ähnliches gilt demnach auch für das Photoleitungsspektrum [8].

Bei dem optischen Übergang werden nun jeweils wieder Excitonen gebildet, so daß sich energetisch vor jedem Energieschwellwert

$$\Delta E (\text{Schwellwert}; L, B) = \Delta E (B = 0) + \hbar \cdot e \cdot B \cdot (0,5 + L) \frac{1}{m(n) + m(p)} \quad (14)$$

optisch eine Excitonenlinienstruktur gemäß Gl. (6) ausbildet.

Damit wiederholt sich die oben diskutierte Frage der Korrelation zwischen Absorption und Photoleitung in periodischen Abständen. Es ist verständlich, daß sich nun bei derart oszillatorischen Spektralfunktionen Aussagen zum positiven oder negativen



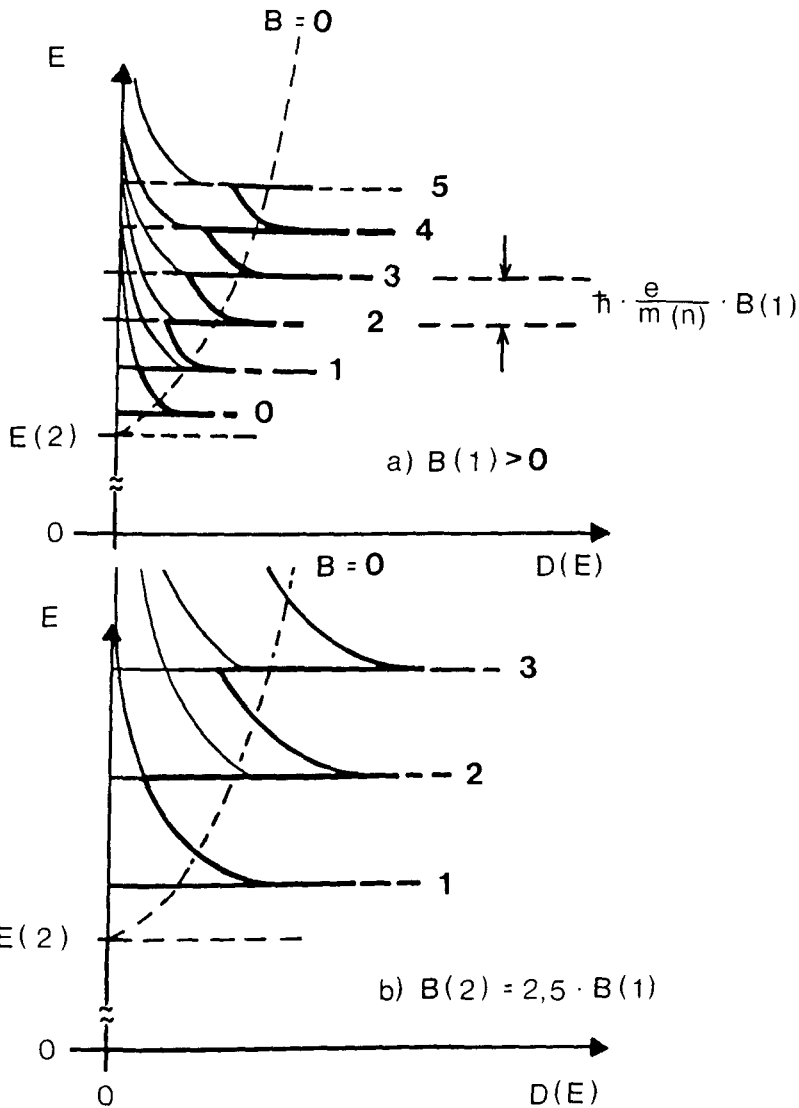


Abb. 10:

Skizze zur Umordnung der Zustandsdichte  $D(E)$  im Leitungsband eines Halbleiters im Magnetfeld: (----) für  $B=0$  sowie a)  $D(E)$  für  $B(1) > 0$  und b)  $D(E)$  für  $B(2) > B(1)$ . Die Quantenzahlen „L“ sind an die Landau-Niveaus angetragen.

Korrelationsverhalten mit sehr viel größerer Sicherheit treffen lassen. Damit ist dann auch die Rolle der Excitonen in der Photoleitung in Abhängigkeit von der Temperatur im Sinne der oben geführten Diskussion sehr viel signifikanter zu beurteilen.

Diese Sicherheit wird dadurch erhöht, daß man die Abstände zwischen den Landau-Niveaus eines Bandes proportional zum Magnetfeld verändern kann (vgl. Gl. (12) und Abb. 10), denn der energetische Abstand  $\delta E$  berechnet sich, wie in Gl. (12) angegeben, im Sinne der Zyklotronresonanztheorie freier Ladungsträger zu:

$$\delta E = \hbar \cdot e \cdot B/m \quad (15)$$

Auf diese Weise kann man die Oszillationsperiode der Absorption bzw. Photoleitung kontinuierlich variieren und damit ausschließen, daß Maxima oder Minima im Spektralverlauf durch „zufällige“ Energiestrukturen, etwa durch Störstellen bedingt, entstanden sind.

Abb. 11 zeigt die „oszillatorische Magnetophotoleitung“ von Germanium im Spektralbereich der einsetzenden direkten Interbandanregung bei verschiedenen Temperaturen [6]. Man erkennt eindeutig den Korrelationswechsel beim Übergang von tiefen zu hohen Temperaturen mit einem dazwischen liegenden praktisch strukturlosen Spektralverlauf.

Damit hat sich die Rolle der Excitonen bei der Eigenphotoleitung so erwiesen, wie sie oben in Einzelschritten entwickelt wurde. Die „oszillatorische Magnetophotoleitung“ hat dazu eine signifikante Bestätigung geliefert.

## VII. Schlußbemerkungen

Es war das Anliegen der vorliegenden Ausführungen, einen Einblick zu geben in das moderne atomistische Verständnis der optischen Anregungsmechanismen, die bei einem Halbleiter zu dem Phänomen der Photoleitung, genauer gesagt, der „Eigenphotoleitung“ führen. Dabei spielen das wellenmechanisch zu interpretierende „Loch“ und die Bildung von Excitonen eine wesentliche Rolle.

Es erscheint selbstverständlich, daß ein Phänomen dieser Art, über das seit seiner Entdeckung im Jahr 1873 tausende von wissenschaftlichen Arbeiten erschienen sind, das an dutzenden von Materialien untersucht worden ist und das in der Optoelektronik eine eminente technische Bedeutung erlangt hat, hier nicht in allen Details dargestellt und nicht jede Aussage dazu im Einzelnen begründet werden kann.

Auch sind alle Konsequenzen weggelassen worden, die die Photoleitung als Experiment interessant machen, um andere mikrophysikalische Halbleiterparameter zu bestimmen. Nur auf die Bestimmungsmöglichkeit der trägen Masse eines freien Elektrons bzw. eines freien Loches, im allgemeinen als die jeweilige „effektive Masse“ bezeichnet, sei hier noch verwiesen. Sie ergibt sich aus der Analyse der Oszillationsperiode in der „oszillatorischen Magnetophotoleitung“, denn diese enthält nach Gl. (15) diesen Wert ohne Verknüpfung mit anderen Parametern.

Ausgeklammert wurden insbesondere die Phänomene einer Beweglichkeitsänderung bezogen auf die Beweglichkeit der bereits im Dunkeln vorhandenen freien Ladungsträger. Dabei kann es sich grundsätzlich um zwei unterschiedliche Prozesse handeln:

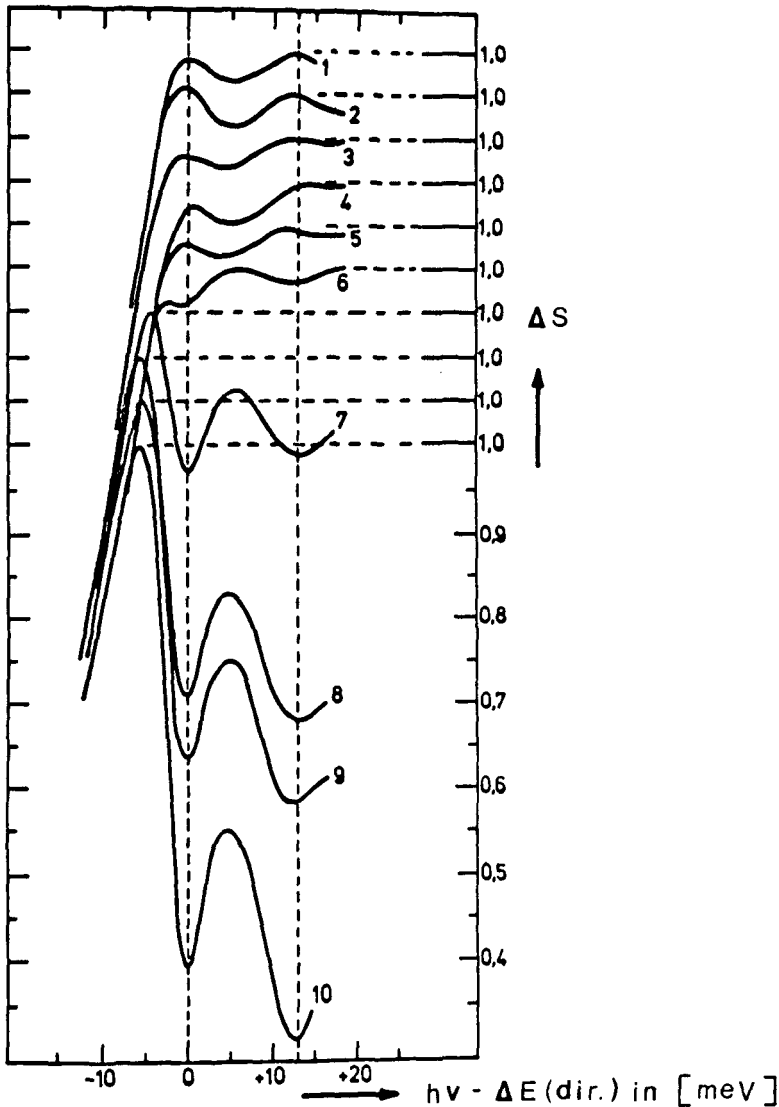


Abb. II:

Photoleitungsspektrum von Germanium im Spektralbereich der direkten Interbandanregung bei verschiedenen Temperaturen. Die Spektralverschiebung infolge der Temperaturabhängigkeit von  $\Delta E(\text{dir.})$  (vgl. Abb. 6) ist zurückkorrigiert. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die Spektren der gemessenen Leitwertänderung  $\Delta S$  (in willkürlichen Einheiten) parallel zur Ordinate um ein entsprechendes Stück verschoben.

Zuordnung der Kurven-Nr. zum Temperaturwert: 1: 320 K; 2: 298 K; 3: 285 K; 4: 250 K; 5: 215 K; 6: 195 K; 7: 180 K; 8: 160 K; 9: 140 K; 10: 107 K.

Nach F.R. Keßler und W. Olsowski [6].

Zum einen können die photoelektrisch generierten freien Ladungsträger selbst eine geänderte Beweglichkeit besitzen. Dies ist z. B. dann der Fall, wenn bei  $h\nu \gg \Delta E$  diese eine geänderte effektive Masse haben, weil sie in höheren Bandzuständen existieren (Stichwort „heiße Elektronen“). Zum anderen kann durch die photoelektrisch erzeugten freien Ladungsträger die Beweglichkeit der bereits im Dunkeln vorhandenen Ladungsträger verändert werden. Z. B. tritt diesbezüglich im Selen eine Beweglichkeitserhöhung auf, weil innere Potentialbarrieren durch die zusätzlichen freien Ladungsträger abgebaut werden. — Derartige Effekte spielen jedoch im „Normalfall der Photoleitung“ keine oder nur eine seltene und spezifische Rolle.

Unerwähnt bleiben mußte ferner, daß man eine entsprechende Analyse, wie die hier vorgetragene, auch im Bereich der indirekten(!) optischen Interbandanregung durchgeführt hat [9], [10], [15]. Übergangen wurden auch kleinere Veränderungen in der Excitonen-Dissoziationsenergie, die darauf beruhen, daß die Excitonen an Störstellen im Festkörper gebunden sein können [7]. — Weiterhin ist unerwähnt geblieben, daß man Excitonen auch auf andere Art und Weise dissoziieren kann, um ihre Existenz bzw. um ihr „Verzweigungsschicksal“ zwischen innerer Rekombination und Dissoziation nachzuweisen [11], [13].

Trotz dieser Beschränkungen wird man jedoch die Grundlagen der Interpretation der Photoleitung entnehmen können, die als „experimentum crucis“ für den Nachweis von Halbleitereigenschaften gilt. Bei einer weitergehenden Analyse spielen die Temperaturvariationen eine Rolle und, das muß nicht gesondert betont werden, die optische Spektralanalyse der Absorption und der Photoleitung selbst.

Experimente dieser Art stellen eine Frage an die Natur. Ihre Antwort und das Verständnis dieser Antwort sind Bestandteil unserer exakten Naturwissenschaft.

### Literatur

- [1] W. Smith, *Nature* / London, vol. 7 (1873), p. 303.
- [2] F. S. Goucher, *Phy. Rev.*, vol. 78 (1950), p. 816.
- [3] G. G. MacFarlane, T. P. McLean, J. E. Quarrington, and V. Roberts, *Proc. Phys. Soc. / London*, vol. 71 (1958), p. 863.
- [4] W. C. Dash and R. Newman, *Phys. Rev.*, vol. 99 (1955), p. 1151.
- [5] F. R. Keßler und C. Wittchen, *Wiss. Berichte HMFA Braunschweig* (ISSN 0723-9459), vol. 11 (1989/90) — im Druck.
- [6] F. R. Keßler and W. Olsowski, *phys. stat. sol.*, vol. 89 (1978), p. 389.
- [7] Zur generellen Information sei empfohlen: K. Cho (Editor), *Excitons*, Springer-Verlag, Berlin, 1979.
- [8] F. R. Keßler und H. Schmidt, *Z. Naturforschung*, vol. 22a (1967), p. 1566.
- [9] F. R. Keßler, J. Nieder, R. Nies, and E. Gaulke, *phys. stat. sol. (b)*, vol. 147 (1988), p. K143.
- [10] F. R. Keßler and J. Nieder, *phys. stat. sol. (b)*, vol. 156 (1989), p. K45.
- [11] Taneo Nishino, Mitsugu Takeda, and Yoshihiro Hamakawa, *J. Phys. Soc. Japan*, vol. 37 (1974), p. 1016.
- [12] A. V. Varfolomeev, B. P. Zakharchenya, A. Ya. Ryskin, R. P. Seisyan, and A. L. Efros, *Sov. Phys. Semicond.*, vol. 11 (1977), p. 1353.
- [13] J. P. Akimchenko, V. S. Vavilov, A. F. Plotnikov, and A. A. Sokolova, *Soviet. Phys. — Solid State*, vol. 10 (1968), p. 770.

- [14] J. Jaumann, p. 1–39 in: F. Sauter (Herausgeber), Halbleiterprobleme, vol. 5, Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1960.
- [15] G. G. MacFarlane, T. P. McLean, J. E. Quarrington, and V. Roberts, Phys. Rev., vol. 108 (1957), p. 1377.

---

#### ANHANG:

### Geschichte der Photoleitung

- 1873 Entdeckung der Photoleitung von Selen in der Überseekabelstation von Valentia/Irland: Beobachtung von Superintendent Mai, publiziert von Willoughby Smith: „Effect of light on Selenium during the passage of an electric current“ (Nature / London, vol. 7 (1873), p. 303 unter dem Datum: 20. 2. 1873). Bereits am 12. 2. 1873 wurde dieser Befund von W. Smith durch Latimer Clark der Society of Telegraph Engineers mitgeteilt. W. Smith war „Electrician“ der Telegraph Construction Company.

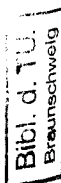
Im gleichen Band der „Nature“ erscheinen auf Seite 340 unter dem Datum vom 6. 3. 1873 von Harry Napier Draper und M. L. Sale getrennte Anfragen bezüglich Details der Entdeckung bzw. zur Realisierung der Experimente, die W. Smith in demselben Band der „Nature“ auf Seite 361 unter dem Datum vom 13. 3. 1873 in einem am 11. 3. 1872 geschriebenen und mit der Ortsangabe „Wharf Road, City Road“ versehenen Artikel kurz beantwortet.

Am 8. Mai 1873 liest Francis Sibson, Vizepräsident der Royal Society, London, der Gesellschaft den Bericht von Lieutenant M. L. Sale vor, der von J. N. Lockyer am 28. 3. 1873 eingegangen war [Proc. Roy. Soc. (London) vol. 21 (1873), p. 283–285]. M. L. Sale konstatierte in seinem Bericht den Effekt und ergänzt ihn durch weitere Versuche, insbesondere durch Messungen zur spektralen Abhängigkeit der Photoleitung des kristallinen Selen.

Eine erste Mitteilung in deutscher Sprache über seine Messungen machte M. L. Sale in den: Pogg. Ann. (= Ann. d. Physik u. Chemie, herausgegeben von J. C. Poggendorf), vol. 150 (1873), p. 333–336.

- 1875 Erweiterung dieser Entdeckung durch W. Siemens auf „metallisches“ Selen und Bau eines ersten „Selen-Photometers“: W. Siemens, Pogg. Ann. (= Ann. d. Physik u. Chemie, herausgegeben von J. C. Poggendorf) vol. 159 [9. Band der 6. Reihe] (1876), p. 117–141.
- 1876 Entdeckung der Photoleitung von Tellur durch W. G. Adams, Proc. Roy. Soc. (London), vol. 24 (1876), p. 163 und Pogg. Ann. (= Ann. d. Physik u. Chemie, herausgegeben von J. C. Poggendorf) vol. 159 [9. Band der 6. Reihe] (1876), p. 629–631.
- 1876 Entdeckung einer durch Licht erzeugten Elektromotorischen Kraft (EMK) an einem Selen-Metall-Kontakt durch W. G. Adams und R. E. Day: Proc. Roy. Soc. A, vol. 25 (1877), p. 113. Damit erste Kenntnis eines „photovoltaischen Effektes“ an Festkörpern.

- [1888 Entdeckung des Äußeren Lichtelektrischen Effektes durch W. Hallwachs an Metallen, also 15 Jahre nach(!) der Entdeckung der Photoleitung an Halbleitern. – Der Hallwachs-Effekt ist das Basisphänomen zur Konstruktion der „Photozelle“.]
- 1922 Untersuchungen von B. Gudden und R.W. Pohl, Göttingen, zum Zusammenhang zwischen Photoleitung und Lumineszenz sowie Prägung des Begriffs „Quantenausbeute“ in Bezug auf den „Inneren Lichtelektrischen Effekt“ (Phys. Z., vol. 23 (1922), p. 417).
- Bis 1923 erschienen mehr als 1500 Arbeiten, und es wurden mehr als 100 Patente erteilt, ohne daß der mikrophysikalische Mechanismus der Photoleitung im entferntesten aufgeklärt worden wäre.
- 1923 Entdeckung der Photoleitung an einem dritten(!) Element: Feststellung der Photoleitung von Kohlenstoff in seiner Modifikation als Diamant durch B. Gudden und R.W. Pohl.
- 1923 und folgende Jahre: Systematische Untersuchungen zur Photoleitung von Selen und Diamant durch B. Gudden und R.W. Pohl in Göttingen. Für den Wert der „Quantenausbeute“ fanden sie am Diamant den Wert nahe bei Eins.  
 Von einem allgemeinen Verständnis der Photoleitung war man jedoch immer noch weit entfernt. Man war eben „an die quietschende Türangel der Physik geraten, an der es vergleichsweise galt, die klassische Mechanik zu studieren“. So kam die Photoleitung lange Zeit in Mißkredit, da sie von zu vielen Nebenbedingungen und „Zufälligkeiten“ abzuhängen schien.
- 1927 Entdeckung der Photoleitung eines vierten(!) Elementes, und zwar von Schwefel durch B. Kurrelmeier.
- 1930 Feststellung des Einflusses eines Magnetfeldes auf die Photoleitung von Cuprit [Mineral des Kupferoxidul =  $\text{Cu}_2\text{O}$ ] durch O. von Auwers bei der Fa. Siemens. Nichtquantitative Feststellung einer ca. 1%-igen Widerstandsänderung des beleuchteten Cuprits bei Anlegen des Magnetfeldes, damit erste Untersuchungen zur „Magnetophotoleitung“.
- 1931 Entdeckung einer EMK parallel zur Einstrahlungsrichtung bei der Photoleitung durch H. Dember („Dember-Effekt“) an Cuprit und Proustit [Mineral =  $\text{Ag}_3\text{AsS}_3$ ]. – Ursache des Dember-Effektes ist die ambipolare Diffusion der photogenerierten freien Elektronen und Löcher: Die EMK kompensiert die unterschiedliche Diffusionsspannung im Sinne der Randbedingung der elektrischen Stromlosigkeit.
- 1933 Entdeckung der Photoleitung von Bleisulfid ( $\text{PbS}$ ).
- 1934 Systematische Untersuchungen zur „Magnetophotoleitung“ durch I. K. Kikoin und M. M. Noskov in den UdSSR an Kupferoxidul.
- 1935 Entdeckung des Photoelektromagnetischen Effektes („PEM-Effekt“) an Cuprit durch G. Groetzinger: Phys. Zeitschr., vol. 36 (1935), p. 169–173. – Der PEM-Effekt ist das Auftreten einer Elektromotorischen Kraft (EMK) transversal zur



Beleuchtungsrichtung und transversal zu einem in der Probe existierenden Magnetfeld. Ursache ist die Lorentzkraft an in Einstrahlungsrichtung infolge des eigenen Konzentrationsgefälles diffundierenden freien, d.h. photogenerierten, Ladungsträgern. Der PEM-Effekt wurde so bei einer Beleuchtungsstärke von 5000.000 Lux und bei einer magnetischen Induktion von 2,7 Tesla gefunden.

- 1945 Nach dem 2. Weltkrieg schlagartige Steigerung im Verständnis der Photoleitung in Parallelentwicklung mit der Halbleiterelektronik (Kristallgleichrichter und Transistor):
- 1946 Entdeckung der Photoleitung von Germanium durch S. Benzer und Silizium durch G. K. Teal, J. R. Fischer und A. W. Treptow.
- 1950 Bestimmung der Quantenausbeute für die Eigenphotoleitung in Germanium mit einem Wert praktisch gleich Eins bei Zimmertemperatur durch F. S. Goucher [Phys. Rev., vol. 78 (1950), p. 816].
- 1950 Systematische Erkenntnisse über die Photoleitung der Elemente liegen vor [T. S. Moss, Photoconductivity in the Elements, London, 1952, Butterworths Sci. Publ.; als Buchveröffentlichung der Dissertation von T. S. Moss, Cambridge, 1950].

Aus heutiger Sicht läßt sich feststellen:

Photoleitung zeigen die folgenden Elemente in den Hauptgruppen im Periodensystem:

III	IV	V	VI	VII
B	C			
	Si	P	S	
	Ge	As	Se	
	Sn	Sb	Te	J

Zu den Elementhalbleitern treten die Verbindungshalbleiter. Die wichtigsten Typen sind die III-V-Halbleiter (H. Welker, Z. Naturforschung, vol. 7a (1952), p. 744) und die II-VI-Halbleiter.

Die Photonenmindestenergie bei der „Eigenphotoleitung“ liegt etwa zwischen 0,15 eV (InSb) und 5,3 eV (Diamant) – vgl. dazu die Photonenmindestenergie beim Äußeren Lichtelektrischen Effekt: von etwa 1,0 eV (Cäsium) bis etwa 4,0 eV (Wolfram).

Photoleitung zeigen auch Organische Verbindungen, die deshalb als „Organische Halbleiter“ bezeichnet werden. Ein bekannteres Beispiel ist Anthrazen [= C(14)H(10)]. Die Photonenmindestenergie liegt meist bei etwa 3 eV (UV-Bereich).

Photoleitung tritt auch durch photoelektrische Ionisation von Fremdatomen in Halbleitern auf („Störstellenphotoleitung“). Die Photonenmindestenergie beträgt dann je nach energetischer Lage des Donator- oder Akzeptorniveaus etwa zwischen 0,01 eV und 0,3 eV.

1955 Erste Absorptionsmessungen zur Differenzierung zwischen „direkten“ und „indirekten“ optischen Interbandübergängen bei Silizium und Germanium, jedoch noch ohne Berücksichtigung von Excitonen:

- a) G. G. MacFarlane and V. Roberts, Phys. Rev., vol. 97 (1955), p. 1714–1716; und: Phys. Rev., vol. 98 (1955), p. 1865–1866
- b) W. C. Dash and R. Newman, Phys. Rev., vol. 99 (1955), p. 1151–1155.

Als weitere photoelektrische Effekte sind bekannt:

- 1.) Negative Photoleitung (F. Stöckmann, Z. Phys., vol. 143 (1955) p. 348–356).
- 2.) Spektral oszillatorische Magnetophotoleitung (F. R. Keßler und H. Schmidt, Z. Naturforschung, vol. 22a (1967), p. 1566–1571).
- 3.) Photoleitung durch Dissoziation von Excitonen (J. P. Akimchenko, V. S. Vavilov, A. F. Plotnikov und A. A. Sokolova 1968).
- 4.) Persistierende Photoleitung (I. V. Markevich und M. K. Sheinkman, Sov. Phys.-Solid State, vol. 12 (1971), p. 2533; H. J. Queisser and D. E. Theodorou, Phys. Rev. Lett., vol. 43 (1979), p. 401–404).
- 5.) Photoleitung als Folge geänderter Beweglichkeit
  - a) „Beweglichkeitsphotoleitung“ durch Anregung von Majoritätsträgern zu höheren Energien. Dort andere effektive Masse und/oder modifizierte Streuung (T. S. Moss, J. Phys. Chem. Solids, vol. 22 (1961), p. 117).
  - b) „Verstärkung“ des inneren lichtelektrischen Effektes durch Beweglichkeitserhöhung infolge des Abbaus von Potentialbarrieren für die Majoritätsträger (am Selen: J. Stuke 1953).
- 6.) Quantenausbeute  $> 1$  infolge Stoßionisation bei der Thermalisierung der Photoladungsträger (mit  $h\nu \gg$  Bandlücke erzeugt).
- 7.) Sensibilisierung der Photoleitung durch Adsorption von „Farbstoffen“.
- 8.) Speicherniveaus („traps“) verzögern die Rekombination der Photoladungsträger und beeinflussen die Temperaturabhängigkeit der Photoleitung.



HANS-DIETER EHRICH, Braunschweig

## **Entwurf verlässlicher Informationssysteme**

Braunschweig, 13. November 1992\*

Die Entwurfs- und Produktionsmethoden für Software sind noch nicht ausgereift. Oft laufen große Softwareprojekte den zeitlichen wie auch finanziellen Planungen davon, und die Produkte sind nicht selten voller Fehler und Mängel.

Die tiefere Ursache hierfür ist, daß die theoretischen Grundlagen des Software-Entwurfs nicht ausreichend verstanden werden. Ein großes Softwaresystem ist ein sehr komplexes formales System. Dessen Struktur und Verhalten gehorchen strengen Regeln, die im Prinzip formalisierbar sind. Es gibt jedoch bislang keine geschlossene Spezifikations- und Entwurfstheorie, die alle relevanten Aspekte abdeckt – zumindest nicht auf eine praktikable Art. Daher lassen sich wichtige Systemeigenschaften oft nicht einmal präzise hinschreiben, geschweige denn mit formalen Beweisen verifizieren.

Für einzelne Systemaspekte gibt es durchaus gut entwickelte Theorien und darauf gegründete Methoden, jedoch passen sie nicht recht zusammen. Zum Beispiel weiß man gut mit abstrakten Datentypen umzugehen. Auch für die Spezifikation dauerhafter Datenbestände gibt es erprobte Ansätze. Die Spezifikation nebenläufiger dynamischer Prozesse ist ebenfalls ein gut erforschtes Gebiet. Es gibt auch Ansätze, mehrere dieser Theorien zu integrieren, vor allem die besonders weit entwickelten Theorien der abstrakten Datentypen und der nebenläufigen Prozesse.

In eigenen Arbeiten wird ein Ansatz verfolgt, der auf die Entwicklung von Informationssystemen abzielt. Informationssysteme sind reaktive Systeme mit großer Datenbasis. Daher werden insbesondere die Ansätze für dauerhafte Datenbestände mit denen für nebenläufige Prozesse integriert, und zwar im heute breit diskutierten Rahmen der sogenannten Objekt-Orientierung: ein Softwaresystem wird dabei als eine Gemeinschaft von autonomen, miteinander kommunizierenden Objekten verstanden.

Die theoretischen Grundlagen dieses Ansatzes erfordern eine besonders eingehende Beschäftigung mit formaler Logik. Als Erweiterung der klassischen Prädikatenlogik sind eine Reihe von Nicht-Standard-Logiken entstanden, die geeignet sind, typische Entwurfsaufgaben auf angemessener Abstraktionsebene präzise zu behandeln. So ist z.B. die temporale Logik für die Beschreibung nebenläufiger Prozesse besonders geeignet.

Neben der Auswahl und Entwicklung geeigneter Darstellungsmittel geht es auch darum, die Struktur von Software besser zu verstehen. Ganz wesentlich ist die Frage, welche Konzepte immer wiederkehren und daher besondere begriffliche, sprachliche und methodische Beachtung erfordern. Neben den Spielarten der Objekt-Kommunikation haben sich insbesondere folgende Konzepte als grundlegend herausgestellt:

---

\* Vortrag vor der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (Zusammenfassung).

Typisierung, Klassifizierung, Spezialisierung, Generalisierung, Aggregation, Konkretisierung oder Implementierung, Modularisierung und Parametrisierung.

Die im Vortrag vorgestellten Grundlagenforschungen werden in verschiedenen Projekten von der EG, dem BMFT, der DFG und dem Nds. MWK unterstützt. Den Kooperationspartnern verdanke ich wertvolle Anregungen. Besonderer Dank gebührt A. Sernadas aus Lissabon: er war von Anfang an maßgeblich an der Entwicklung der vorgetragenen Ideen beteiligt.

OSKAR MAHRENHOLTZ, Hamburg

## Eis als Baustoff in Permafrostregionen

Braunschweig, 17. Januar 1992\*

In den letzten Jahren wurde in den Polargebieten intensiv nach Bodenschätzen, insbesondere nach Erdöl und Erdgas, gesucht. In Permafrostregionen kann Eis als Baustoff eingesetzt werden. Als Baustoff hat Eis hier viele Vorteile im Vergleich mit gewöhnlichen Materialien: Eis ist am Ort praktisch unbegrenzt verfügbar; eine Eisstruktur ist billig herzustellen und bringt bei der Demontage wenig Umweltbelastung mit sich. Seit langem dienen Eis und Schnee schon als Baustoff in den arktischen Gebieten: Eisdecken als Landepisten für Flugzeuge, Offshoreplattformen aus gespritztem Eis, Kühlhäuser aus Eis, usw. Bei solchen Eisstrukturen braucht man Prognosen über die Tragfähigkeit und das Langzeitverformungsverhalten. Dazu werden Kenntnisse über die mechanischen Eigenschaften von Eis benötigt.

Eis ist im Sinne seiner mechanischen Eigenschaften ein sehr komplexes Material. Weil der Baustoff Eis bei normaler Arbeitstemperatur im Vergleich zu Metallen eine extrem hohe homologe Temperatur hat, hängt sein mechanischer Charakter von mehreren Faktoren ab, wie der Dehnungs- bzw. Belastungsgeschwindigkeit, der Temperatur, der Aktivität der Mikrorisse und Mikroporen, der Korngröße und anderen. Darüber hinaus erschwert das gleichzeitige Auftreten von Sprödigkeit und Duktilität die Beschreibung des Verformungsverhaltens.

Unter schlagartiger Belastung ist Eis spröde. Aber wegen seiner Kriechneigung sind die Materialparameter temperatur- und zeitabhängig. Der Elastizitäts-Modul oder die Dehnungsrate können in einem breiten Bereich variieren. Der höchste Wert ist durch die Belastung bei sehr hoher Geschwindigkeit (bei der Geschwindigkeit elastischer Wellen) bestimmt worden. Der E-Modul ist im allgemeinen schwach temperaturabhängig.

Die Festigkeit von Eis ist die maximale Spannung, die beim Versuch, entweder bei konstanter Belastungsrate oder bei konstanter Verzerrungsrate, gemessen werden kann. Die Festigkeit von Eis ist stark temperatur- und belastungsratenabhängig: Je niedriger die Temperatur und je höher die Belastungsrate, umso höher ist die Festigkeit von Eis. Bei niedriger Belastungsrate zeigt Eis keinen wesentlichen Unterschied unter Zug- und Druckbelastung. Bei höherer Belastungsrate ist die Festigkeit von Eis unter Zugbelastung viel kleiner als die unter Druckbelastung.

Das Kriechverhalten von Eis unter konstanter Belastung ist in zwei unterschiedlichen Typen zusammenzufassen: Begrenztes Kriechen und unbegrenztes Kriechen. Unter niedriger Spannung ist das mechanische Verhalten von Eis durch das begrenzte Kriechen charakterisiert, in dem die Dehnungsgeschwindigkeit ständig abnimmt. Unter höherer Spannung ist die Kriechverformung unbegrenzt, wobei drei unter-

---

\* Vortrag vor der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (Zusammenfassung).

schiedliche Kriechphasen zu erkennen sind. In der ersten Kriechphase, die als Primärkriechen oder Transientkriechen bezeichnet wird, nimmt die Kriechdehnungsgeschwindigkeit ständig ab. Das Sekundärkriechen wird auch als Stationärkriechen bezeichnet, weil in dieser Phase die Dehnungsgeschwindigkeit in einem bestimmten Zeitraum fast konstant bleibt. Die Tertiärperiode ist ein Beschleunigungsvorgang der Dehnungsgeschwindigkeit bis zum Kriechbruch. Unter noch größerer Spannung ist keine deutliche Sekundärkriechperiode zu erkennen. In diesem Fall schrumpft die Sekundärperiode zu einem Punkt mit Nullbeschleunigung der Dehnungsgeschwindigkeit oder der minimalen Dehnungsgeschwindigkeit.

Wegen der Besonderheit der mechanischen Eigenschaften von Eis verhält sich eine Eisstruktur unter Belastung mit hoher Geschwindigkeit ideal elastisch und unter statischer oder langsam veränderlicher Belastung duktil. In der Technik ist es wichtig, die Übergangsgrenze zwischen Kriechen und Spröbruch für eine Eisstruktur zu kennen.

Unter dynamischer Belastung kann das mechanische Verhalten einer Eisstruktur mit klassischer Elastizität studiert werden. Der Kriterium für die Belastungsgrenze ist mit Hilfe der linearen Bruchmechanik zu bestimmen. Dabei wird häufig die Belastung, bei der der erste Riß entsteht, als Grenzwert der zuverlässigen Belastung gewählt.

Unter statischer Belastung ist die Tragfähigkeit einer Eisstruktur durch die maximale erlaubte Verformung bestimmt. Zur Vorhersage der Verformung einer Eisstruktur muß man ein Stoffgesetz haben, das das dreidimensionale Primär-, Sekundär und Tertiärkriechen beschreiben kann. Bei den einschlägigen Forschungen kann man zwei Richtungen unterscheiden: Die Untersuchung auf der Basis der molekularen Mikrostrukturen und die phänomenologische Untersuchung mit Hilfe der Kontinuumsmechanik. Beide Forschungsrichtungen profitieren voneinander und sind gleich wichtig für die Eismechanik. In der Ingenieurtechnik haben aber nur phänomenologische Stoffgesetze Anwendungen gefunden, weil sie für die numerischen Berechnungen sehr praktisch sind, und bei ihnen können die benötigten Materialparameter durch einfache Versuche bestimmt werden.

Die Nachteile des Baustoffs – Eis – sind seine geringe Festigkeit, seine Spröbruchneigung und seine Kriechneigung. Viele Forscher haben versucht, die Tragfähigkeit von Eisstrukturen durch Verstärkung zu verbessern, so durch Einbringen verschiedener Materialien, z.B. Sägemehl, zerrissenes Zeitungspapier und Borkenfasern.

Vor kurzem wurde ein neuer auf Eis basierender Baustoff, sogenanntes ICE-CRETE, entwickelt. Es wird berichtet, daß durch die richtige Verstärkung die Festigkeit von Eis um das Vier- bis Fünffache gesteigert werden kann. Wichtig ist, daß die Spröbruchneigung durch die Verstärkung wesentlich verändert werden kann: eine richtig verstärkte Eisstruktur bricht nicht mehr plötzlich zusammen.

Auch die Kriecheigenschaft einer Eisstruktur kann durch Verstärkung wesentlich verbessert werden. Im Labor wurden Versuche mit verstärkten Eisplatten mit vier unterschiedlichen Verstärkungszusätzen getestet, nämlich Glasfasern, Holzmehl, Holzspänen bzw. einer Kombination von Glasfasern und Holzmehl. Das beste Resultat erzielte letztere. Im günstigsten Fall beträgt die Durchsenkungsgeschwindigkeit der verstärkten Eisplatten nur rund 25% der Durchsenkungsgeschwindigkeit der unverstärkten Eisplatte.

Eis als Kontinuum ist ein faszinierendes Thema, dem sich inzwischen mehrere Arbeitsgruppen widmen, auch unter dem Aspekt der Klimaveränderung. Diese Gruppen (Bochum (RUB), Darmstadt (THD), Hamburg (HSVA, TUHH)) haben inzwischen eine Arbeitsgemeinschaft gebildet, um so Synergieeffekte bei weiteren Untersuchungen zu nutzen.



FRANK HAESSNER, Braunschweig

## **Forschungsarbeiten des Instituts für Werkstoffe der Technischen Universität Braunschweig**

Braunschweig, 28. Februar 1992\*

### **Vorbemerkung**

Das Institut für Werkstoffe ist aus einer Reihe von Zusammenlegungen und Aufteilungen innerhalb der letzten 50 Jahre hervorgegangen. Aus dem um 1930 bestehenden Laboratorium für Festigkeitsuntersuchungen mit Wöhler-Institut und dem Technologischen Institut für Schweißtechnik ist es schließlich durch Ausgliederung der Schweißtechnik entstanden. Es wird von einem Vorstand, bestehend aus Herrn Prof. Günter Lange und dem Verfasser, geleitet.

Das Institut für Werkstoffe ist eine vorwiegend experimentell arbeitende wissenschaftliche Einrichtung mit einem großen Gerätepark. Es ist zuständig für die Grundausbildung aller Studenten in Werkstoffkunde für die Fachbereiche „Maschinenbau“ und „Elektrotechnik“. Dem Institut ist eine amtlich anerkannte Materialprüfstelle für Werkstoffe des Maschinenbaus angegliedert. Die Schwerpunkte der gegenwärtigen Forschungsaktivitäten liegen auf den Gebieten des mechanischen und des thermischen Verhaltens von metallischen Werkstoffen. Das Interesse erstreckt sich dabei sowohl auf „klassische“ Werkstoffe, wie beispielsweise Aluminium- oder Kupfer-Legierungen oder Stähle, als auch auf „moderne“ Werkstoffe, von denen amorphe Legierungen, sogenannte metallische Gläser, oder nanokristalline Materialien beispielhaft genannt seien. Im einzelnen lassen sich die Aktivitäten fünf Arbeitsgebieten zuordnen.

### **Mechanisches Verhalten und Werkstoffgefüge**

Ziel dieses Arbeitsgebietes ist es, die Brauchbarkeit von Konstruktionswerkstoffen zu beurteilen, zu sichern und laufend zu verbessern. Von besonderer Bedeutung sind dabei die mechanischen Eigenschaften. Diese können durch Änderung des Werkstoffgefüges in weiten Grenzen beeinflusst werden. So werden im Institut beispielsweise durch Änderung der Werkstoffzusammensetzung sowie durch verschiedene thermomechanische Behandlungen unterschiedliche Gefüge hergestellt. Untersucht werden die Zusammenhänge zwischen der Werkstoff-Festigkeit, der Beanspruchungsart und dem Gefüge sowie die makroskopischen und mikroskopischen Bildungsmechanismen der verschiedenen Arten des duktilen Bruches. Eine Arbeitsgruppe befaßt sich mit dem Werkstoffverhalten unter mehrachsiger dynamischer Belastung. Von besonderem Interesse ist das Verhalten metallischer Gläser sowie nanokristalliner Stoffe, die im Vergleich zu konventionellen Metallen sehr ungewöhnliche Eigenschaften aufweisen.

---

\* Vortrag vor der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (Kurzfassung).

Bei neuzeitlichen Konstruktionen und Herstellungsverfahren treten Beanspruchungen, die zu nichtelastischem Bauteilverhalten führen, in vielfältiger Weise auf. Die Entwicklung von Stoffgesetzen für diesen Fall und ihre technische Anwendung sind Gegenstand des Sonderforschungsbereiches 319 „Stoffgesetze für das inelastische Verhalten metallischer Werkstoffe – Entwicklung und technische Anwendung –“. In diesem Zusammenhang werden im Institut zwei Projekte bearbeitet. Sie betreffen die experimentelle Erfassung der Phänomene des Werkstoffverhaltens und ihre Verknüpfung mit mikroskopischen Materialmodellen.

### **Anelastisches Verhalten und Mechanische Spektroskopie**

Jeder Werkstoff, der zu mechanischen Schwingungen angeregt wird, schwingt gedämpft. Dieses Phänomen ist einerseits von großer praktischer Bedeutung. Es kann andererseits zur Erforschung des Werkstoffaufbaus und der in Werkstoffen ablaufenden Vorgänge herangezogen werden. Im Institut dienen die Dämpfungsmessungen in erster Linie dazu, Umwandlungsvorgänge und neuartige Werkstoffzustände zu untersuchen. Dazu gehören Phasenumwandlungen, Erholungs- und Rekristallisationsvorgänge, die Umwandlungen metallischer Gläser (Glasübergang, Kristallisation) und nanokristalline Materialien. Ein aktueller Schwerpunkt sind die Dämpfungsvorgänge, die durch gelösten Wasserstoff in intermetallischen Phasen mit verschiedenen (kristallinen oder glasartigen) Strukturen erzeugt werden. Ziel dieser Untersuchungen sind dabei nicht nur die einzelnen Relaxationsprozesse des Wasserstoffs als Ursache der Dämpfung. Diese Prozesse sollen vielmehr auch als lokal empfindliche Sonde benutzt werden, um mittels mechanischer Meßgrößen (Betrag, Frequenz- und Temperaturspektren der Dämpfung) Aufschluß über bestimmte strukturelle Einzelheiten der beteiligten Werkstoffzustände zu gewinnen.

### **Gase in Metallen**

Diese Forschungsrichtung befaßt sich mit dem Lösungsverhalten von Gasen in festen Metallen und mit den durch diese Gase verursachten – meist negativen – Eigenschaftsänderungen. In erster Linie wird die Einwirkung von Wasserstoff auf Stähle untersucht, die seit langem als außerordentlich schädlich bekannt ist. Darüber hinaus verhält sich Wasserstoff in Stahl sehr komplex. Zur Erfassung der Zusammenhänge werden Stahlproben mit Wasserstoffgas eines definierten Druckes bis zum Gleichgewicht beladen und dann analysiert oder mechanisch geprüft. Die physikalischen Vorgänge bei der Gasaufnahme und -verteilung im Stahl werden außerdem in Permeationsversuchen gemessen. Dabei dringt das Gas durch eine Stahlplatte, und der austretende Strom ins Vakuum wird gemessen. In jüngster Zeit wurde der Beultest als ein neues technologisches Prüfverfahren eingeführt. Bei diesem Test wird das Material einem mehrachsigen Spannungszustand ausgesetzt, der dem bei der Anwendung von Druckgas ähnlich ist. Dieser praxisnahe Test hat darüber hinaus die Vorteile, daß Probenherstellung und Versuchsführung einfach sind. Die Ergebnisse über das Verhalten und den



Einfluß speziell des Wasserstoffs sind von erheblicher praktischer Bedeutung für die Bewertung und Realisierung der Wasserstofftechnologie insbesondere von Lagerung und Transport des Wasserstoffs.

### **Kalorimetrie**

Beim Ablauf von Reaktionen in Werkstoffen treten Wärmetönungen auf. Mit Hilfe thermischer Analysenmethoden lassen sich aus solchen Wärmetönungen in Verbindung mit anderen Informationen Rückschlüsse auf die zugrunde liegenden Vorgänge im Werkstoff ziehen. Es stehen vier hochempfindliche Wärmeleitungs-Kalorimeter zur Verfügung, die sowohl integrale als auch differentielle Messungen der Energiefreigabe erlauben. Die Kalorimeter dienen in erster Linie zur Messung der Energie, die während der Erwärmung plastisch verformter Metalle freigesetzt wird. Neben der Erforschung des Einflusses von Werkstoff- und Verformungsparametern auf die integrale Rekristallisationswärme wird in neuerer Zeit das Hauptaugenmerk auf die Rekristallisationskinetik gelegt. Ferner werden kalorische Messungen an abgeschreckten Nichtgleichgewichtszuständen durchgeführt. Dabei sollen Aufschlüsse über den Einfluß einer plastischen Verformung auf die Relaxations- und Kristallisationsvorgänge derartiger Materialien gewonnen werden. Von besonderer Bedeutung ist ein selbstentwickeltes Tieftemperaturkalorimeter, in dem die Transformationskinetik von Werkstoffen im Temperaturbereich zwischen der Temperatur des flüssigen Stickstoffs bei  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis hinauf zu  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  ermittelt werden kann. Damit lassen sich auch Metalle mit niedrigen Schmelzpunkten, wie beispielsweise Blei und Zink, kalorisch befriedigend untersuchen.

### **Werkstoffprobleme bei Schadensfällen**

Das Institut und die ihm angegliederte amtliche Materialprüfstelle verfügen über eine jahrzehntelange Erfahrung auf dem Gebiet der Schadensanalyse. Neben Fällen aus dem allgemeinen Maschinenbau werden Probleme aus Spezialgebieten wie Luftfahrttechnik, Medizinische Implantate oder Chemische Industrie, wo insbesondere Fragen der Korrosion zu klären sind, bearbeitet. Gleichrangig neben der Untersuchung von Schadensfällen steht die Beratung bei der Werkstoffauswahl und die Prüfung von Bauteilen vor dem Einsatz im Betrieb. Diese Verknüpfung von amtlicher Materialprüfstelle mit dem Institut ergibt einen optimalen Einsatz der apparativen Ausstattung durch gemeinsame Nutzung und direkten Transfer aller wesentlichen neuen Erkenntnisse aus der Wissenschaft in die Praxis und umgekehrt. So wird beispielsweise in Zusammenarbeit mit der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde jährlich ein internationales Fortbildungsseminar in der Schweiz veranstaltet.

---

Prof. Dr. rer. nat. Frank Haeßner  
Julius Leber-Str. 46 · 3300 Braunschweig



HELMUT HENNE, Wolfenbüttel

## **Literaten als Chronisten der Sprache** **Am Beispiel von Arno Schmidt und Botho Strauß**

Braunschweig, 14. März 1992\*

**Zusammenfassung:** Mit dem Ende der Nachkriegszeit und der Vereinigung der beiden deutschen Teilstaaten wurde die Gegenwart vor unseren Augen historisch. Eine deutsche Sprachgeschichte der Nachkriegszeit, die nunmehr zu konzipieren und zu verfassen ist, darf literarische Quellen, die sich auch als Chroniken verstehen, nicht übergehen. Hierzu zählt das Werk von Arno Schmidt und Botho Strauß. Am Beispiel von Arno Schmidts „Leviathan oder Die beste der Welten“ (1949) und Botho Strauß „Paare, Passanten“ (1981) wird die zeitgeschichtliche Authentizität dieser Texte und ihre chronikalische Qualität herausgearbeitet.

Das soll hier an zwei Beispielen dargestellt werden: Im Text von Arno Schmidt wird gleich zu Anfang ein Werbespruch der Zeit – die Handlung spielt im Februar 1945 – zitiert („Millionen tragen Greiff-Kleidung“), der eine fatale Semantik entfaltet: Die „Blauleinenzüge der Schlosser“ aus den Greiff-Werken in Greiffenberg in Schlesien sind auch Symbol für den Griff von Millionen Deutschen nach Leben und Besitz ihrer Nachbarn.

„Zum Kottbusser Tor!“ riefen sich die versprengten Demonstranten zu, und einige nahmen die U-Bahn. Aber nein, hier muß ich umkehren. Kann nicht Mitläufer bei den Jungen sein“, heißt es bei B. Strauß. Das Reizwort „Mitläufer“ verbindet die Menschen von 1945, die nun selbst auf der Flucht sind, und die Demonstranten der 70er Jahre. Diese streben dem „Tor“ zu, das für Offenheit und Freiheit steht. Dieser Verlockung versagen sich „einige“, die die „U-Bahn“ nehmen. Die tiefere Bedeutung dieses Wortes liest man natürlich mit: „U“ steht für Untergrund, in den die Demonstranten, z.B. als terroristische Gruppe, abtauchen.

„Empfindliche Chronisten“ (B. Strauß) sind gute Schriftsteller allemal. Ihre Texte sind literarische Chroniken, die insofern auch Quellen der Sprachgeschichte sind. Die systematische Analyse und Interpretation legt das bloß.

---

\* Vortrag vor der Klasse für Geisteswissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (Zusammenfassung).

Der Text des Vortrags wird publiziert in der Festschrift für Peter v. Polenz. Berlin, New York: de Gruyter 1993

Prof. Dr. Helmut Henne  
Platanenstraße 27 · 3340 Wolfenbüttel



## K O M M I S S I O N E N

### **Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunstgeschichte**

Am 17.9.1992 verstarb im Alter von 73 Jahren Professor Dr. phil. Dr. phil. h.c. Martin Gosebruch, auf dessen Initiative hin die Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunstgeschichte 1982 entstanden war. Bis zu seinem Tode war er ihr engagierter Vorsitzender. Daß die Kommission ungewöhnlich erfolgreich arbeitete und schon früh über die innerdeutsche Grenze hinweg auf mehreren Tagungen die mittelalterliche Kunst des einst altsächsischen Raums wieder zu einem zentralen Forschungsthema der Bau- und Kunstgeschichte werden ließ, bleibt sein Verdienst. Fünf Bände mit Tagungsergebnissen liegen innerhalb der Schriftenreihe der Kommission inzwischen gedruckt vor.

Die Kommission sieht sich verpflichtet, auf diesen Leistungen aufzubauen. Die kommende Hauptaufgabe wird es sein, die Zielsetzung der künftigen Arbeit zu klären und zu einem geordneten Vorsitz zu kommen, ebenso innerhalb der Schriftenreihe der Kommission die Ergebnisse der Tagungen „Goslar – Bergstadt-Kaiserstadt in Geschichte und Kunst“ (1989) und „Königtum und Kirche als Kulturträger im östlichen Harzvorland“ (1991) vorzulegen.

CORD MECKSEPER

## **Kommission für Umwelt und Technik**

Unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. JESCHAR fand am 21./22. Mai 1992 in Clausthal-Zellerfeld ein wissenschaftliches Symposium zum Thema „Technische Möglichkeiten zur Minderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes“ statt.

Das Ziel dieses Symposions war es, die interdisziplinäre Diskussion und Zusammenarbeit zwischen den Fachbereichen Natur- und Ingenieurwissenschaften – unter Einbeziehung der Industrie – verstärkt anzuregen. Der thematische Schwerpunkt des ersten Tages betraf die wissenschaftliche Darstellung der anthropogen bedingten Kohlendioxidproblematik (Kohlendioxidkreislauf, mögliche Klimaentwicklungen etc.).

Am zweiten Tag des Symposions wurden die verfahrenstechnischen Umsetzungsmöglichkeiten der CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale (rationelle Energieanwendung; Einsatz neuer Kraftwerksgenerationen, z. B. Gas/Dampf-Turbinen Kraftwerke; Deponierung von CO<sub>2</sub> in der Tiefsee; Einbindung von Kohlendioxid in Biomasse) diskutiert.

Das Interesse an diesem Symposium als Plattform für einen fachübergreifenden Gedankenaustausch erwies sich als so groß – es nahmen etwa 50 Personen aus verschiedenen Bereichen teil –, daß für die Zukunft weitere Veranstaltungen in diesem Rahmen geplant sind.

RUDOLF JESCHAR

## **Kommission für Recht und Technik**

Die Arbeit der Kommission blieb wegen finanzieller Anlaufschwierigkeiten im Stadium der Entwicklungsplanung.

**FEIERLICHE  
JAHRESVERSAMMLUNG  
19. JUNI 1992**





VOLKER KREBS und ANDREAS REHKOPF, Karlsruhe

## **Modellierung, Simulation und Steuerung flexibler Fertigungssysteme\***

### **1. Einführung**

Die diesem Beitrag zugrundeliegenden Arbeiten<sup>1)</sup> haben das Ziel, Methoden zur Beschreibung und Simulation von diskreten ereignisorientierten dynamischen Prozessen (DEDP) am Beispiel Flexibler Fertigungssysteme (FFS) zu entwickeln und zu erproben, sowie eine Optimierung des Fertigungsablaufs im Sinne einer Regelung vorzunehmen. Dazu wird eine hierarchische Systemstruktur aufgebaut, in der die Methode der Petrinetze (PN), ergänzt durch wissensbasierte Komponenten, zu einem effizienten integrierten Gesamtsystem führen.

Konkret wird eine aus einem Verbund von sechs Bearbeitungsmaschinen bestehende Fertigungsanlage betrachtet, die durch zeitbewertete Petrinetze in zwei Abstraktionsebenen modelliert wird. Die einzelnen Bearbeitungsmaschinen der oberen Modellierungsebene liegen als PN-Module vor und werden auf der unteren Ebene jeweils als detailliertes, ebenfalls modulares PN-Maschinenmodell dargestellt, wobei hier als repräsentative technische Grundlage für den PN-Modellentwurf die Fertigungszelle MD 5 der Firma Gildemeister gewählt wurde. Diese beiden Abstraktionen bilden zusammen das dynamische ereignisdiskrete Prozeßmodell (DEDP-Modell) „Petri-netz“, das in dem klassischen Ebenenmodell der Fertigungssteuerung nach Bild 1 der Maschinenebene entspricht. Die über der Maschinenebene liegende Steuerungsebene, sowie die darüber liegende PPS-Ebene (PPS: Produktionsplanung und -Steuerung) werden in dem äquivalenten Ebenenmodell – wie es hier Gegenstand der Betrachtung ist – zusammen als DEDP-Ebene „Planung und Steuerung“ verstanden (Bild 1). Dabei erfolgt die Steuerung des Fertigungsablaufs in der realisierten PN-Modellstruktur des FFS über einen wissensbasierten Ansatz auf Basis der XPS-Entwicklungsumgebung „Goldworks“ unter Einbeziehung deterministischer und heuristischer Optimierungsstrategien. Simulationsuntersuchungen des Fertigungsablaufs gestatten vertieften Einblick in das Systemverhalten und ermöglichen einen Vergleich der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Strategien zur Fertigungssteuerung.

---

<sup>1)</sup> Das Vorhaben wurde mit freundlicher Förderung durch die DFG im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Messen, Steuern, Regeln von Systemen komplexer Struktur“ (Az. Kr. 949/2) durchgeführt.

---

\* Vortrag bei der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 19. Juni 1992.

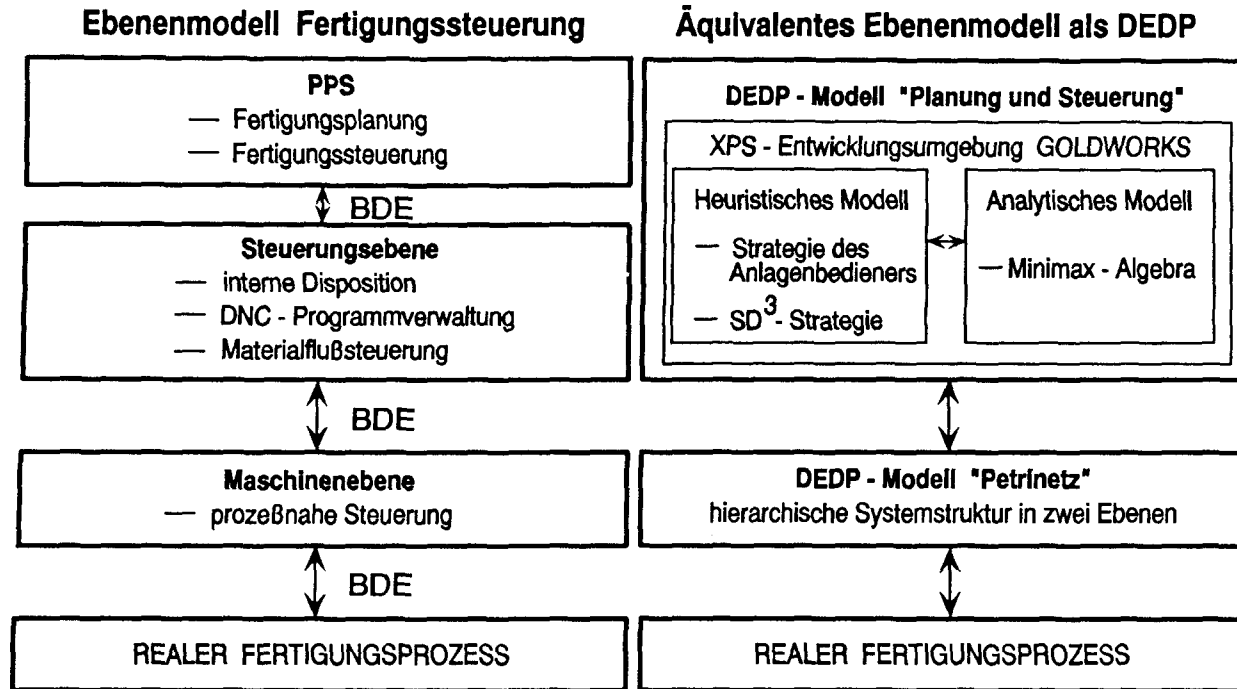


Bild 1: Ebenenmodell der Fertigungssteuerung (links) und äquivalentes DEDP - Modell (rechts)

Bild 1: Ebenenmodell der Fertigungssteuerung (links) und äquivalentes DEDP-Modell (rechts).

## 2. Modellierung und Simulation der Fertigungsanlage mit Petrinetzen

In einer Vielzahl automatisierungstechnischer Anwendungen hat sich die aus dem Bereich der Automatentheorie stammende Methode der Petrinetze (PN) zur Modellierung komplexer, parallelstrukturierter Prozeßabläufe bereits sehr gut bewährt [1], [2], [3]. Nach C. A. Petri können Prozesse als vernetzte Systeme von Situationen (z. B. Bearbeitungs-/Maschinensystemzustände) und Ereignissen (sprungförmige Zustandsveränderungen bzw. unvorhergesehene Fehlerereignisse) verstanden werden, wobei Situationen im PN sog. Stellen (graphisch Kreise) und Ereignisse sog. Transitionen (graphisch Kästchen) entsprechen. Zur Darstellung der Kausalität von Abläufen wie Informations- und Materialfluß, erhalten bestimmte Stellen des Netzes Marken (graphisch dargestellt als Punkte in den entsprechenden Kreisen), die nach definierten Regeln über die gerichteten Kanten, den Verbindungslinien der Stellen und Transitionen, durch das Netz wandern. Die Markenwanderung wird mittels der Transitionen bewerkstelligt, die Marken aus ihren Vorstellen entnehmen und Marken in ihren Folgestellen ablegen (Schalten oder Feuern der jeweiligen Transition). Neben der so gewonnenen Modellierung des logischen Verhaltens des DEDP gestattet die Methode der zeitbewerteten Petrinetze auch die Einbeziehung des zeitabhängigen Netzverhaltens. Im vorliegenden Anwendungsfall hat sich die Verwendung retardiert zeitbewerteter Prekanten (Kanten von den Vorstellen zu den nachfolgenden Transitionen) als zweckmäßig erwiesen. Bei diesem Konzept wird Einfluß auf die Zeitdauer der Schaltbarkeit der Transitionen genommen, während der eigentliche Schaltvorgang der Transitionen selbst, ganz im Sinne des Petri'schen Ansatzes, ohne zeitlichen Einfluß bleibt. Transitionen, die das Eintreten von Störungen bzw. Fehlern als unbeabsichtigter Zustandsveränderung darstellen, werden – alternativ zu den entsprechenden regulären Transitionen als beabsichtigter Zustandsveränderung – in der Simulation so geschaltet, daß ihr Schaltzeitpunkt einer realistischen Zufallsverteilung genügt.

Mögliche, sich gegenseitig ausschließende Verhaltensformen des DEDP werden modelliert, indem aus einer Vielzahl möglicher alternativer Transitionen, die alle von derselben Vorstelle ausgehen, eine bestimmte Transition zum Schalten ausgewählt wird. Diese Transitionen-Schaltauswahl kann graphisch als Weichenstellung für die Festlegung der Markenpfade verstanden werden, wie in Bild 2 skizziert ist. Hierzu wurden zunächst einige einfache, jedoch sehr effektive Entscheidungsregeln auf Basis der aktuellen Netzmarkierung formuliert, womit elementare Strategien des Anlagenfahrers ausgedrückt werden konnten. Für das Petrinetz der detailliert modellierten Fertigungszelle der unteren PN-Ebene reicht dieser einfache Konflikt-Steuerungsmechanismus auf Basis der Entscheidungsregeln vollkommen aus. Zur Beschreibung des gesamten Fertigungssystems mit seiner hohen Steuerungskomplexität bedarf es freilich noch der Erweiterung und Modifikation, auf die im nächsten Abschnitt eingegangen wird. Die hierarchisch aufgebaute PN-Modellierung der Fertigungsanlage erfolgt – wie oben angedeutet – in zwei Ebenen. Dabei stellt die obere Ebene ein Verbundsystem elementarer Netzmodule dar, die Fertigungsmaschinen repräsentieren. Diese Netzmodule sind an eine Netzschleife als Modell eines Materialflußsystems

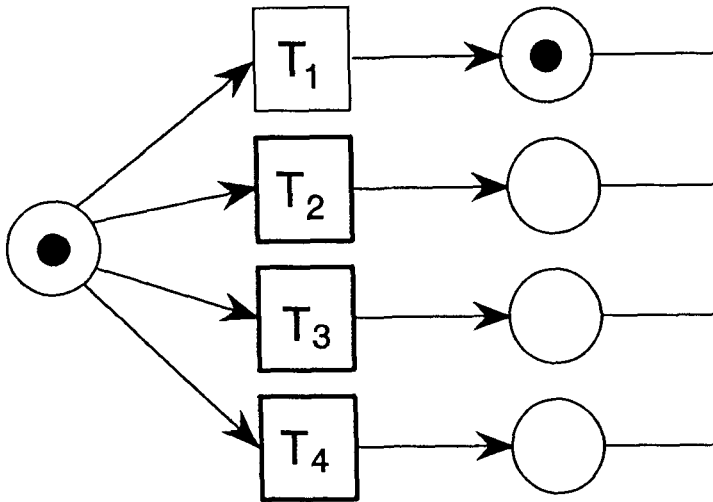


Bild 2:

*Konfliktsituation im Petrinetz: Eine der aktivierten Transitionen  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  wird durch Entscheidungsregeln zum Schalten ausgewählt;  $T_1$  ist nicht schaltbar, da ihr Nachbereich markiert ist.*

gekoppelt (Bild 3). Den elementaren Netzmodulen entsprechen auf der unteren PN-Darstellungsebene jeweilige PN-Maschinenmodelle in sehr verfeinerter Darstellung, die bei der dynamischen Netzsimulation als LISP-Unterprogramme im Hintergrund mitlaufen, auf Benutzerwunsch auf dem Bildschirm gezeigt werden können und Aufschluß über die aktuelle Bearbeitungs- und Fehlersituation geben.

Für die Softwarerealisierung der Petrinetze wurde ein eigenes Softwarewerkzeug aufgebaut, da weder Expertensystem-Tools, noch derzeit verfügbare PN-Tools den grundlegenden Anforderungen zum Netzentwurf und zur dynamischen Simulation genügten und sich auch nicht als ausreichend offen zur Einbindung mathematischer Optimierungsverfahren wie der Minimax-Algebra erwiesen. Mit dem entwickelten Simulationsprogramm, das in Common-LISP auf einer SUN-Workstation 4/330 erstellt wurde, kann ein Petrinetz entworfen, auf dem Bildschirm graphisch ausgegeben, analysiert und dynamisch simuliert werden. Es kann entweder eine automatische Simulation durchgeführt werden, wobei die zu schaltenden Transitionen über die o.g. Entscheidungsregeln ausgewählt werden, oder alternativ eine interaktive Simulation, bei welcher der Benutzer die zu schaltenden Transitionen selbst auswählt. Die jeweilige Darstellungsebene kann vom Benutzer während des Programmdurchlaufs auf dem Bildschirm generiert werden, abhängig davon, ob er die Netzdynamik des Maschinenverbundsystems studieren möchte oder sich nur für die detailliert dargestellten Bearbeitungsvorgänge in einer einzigen Maschine interessiert.

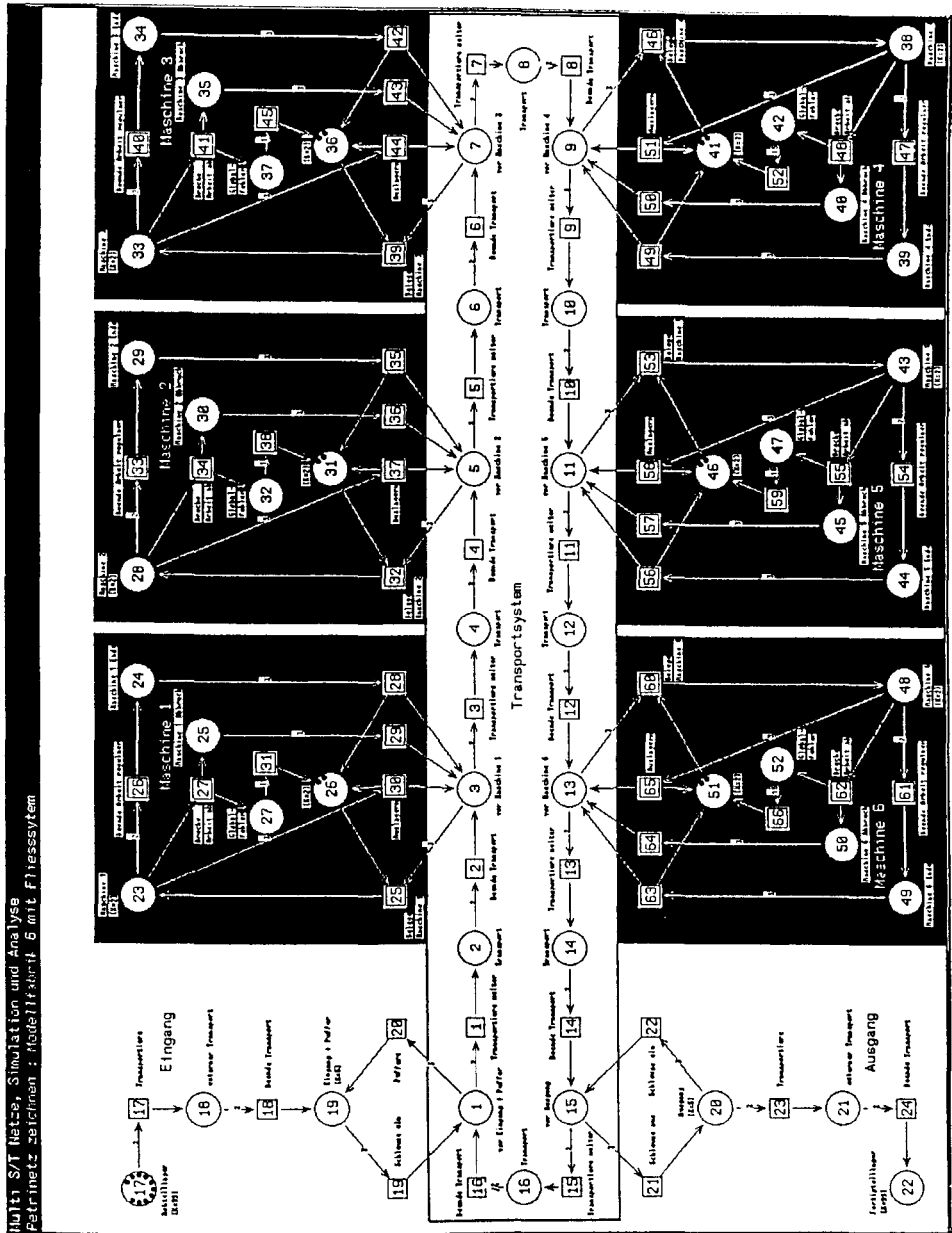


Bild 3:  
Fertigungsanlage der oberen PN-Ebene mit 6 Maschinen und Transportsystem.

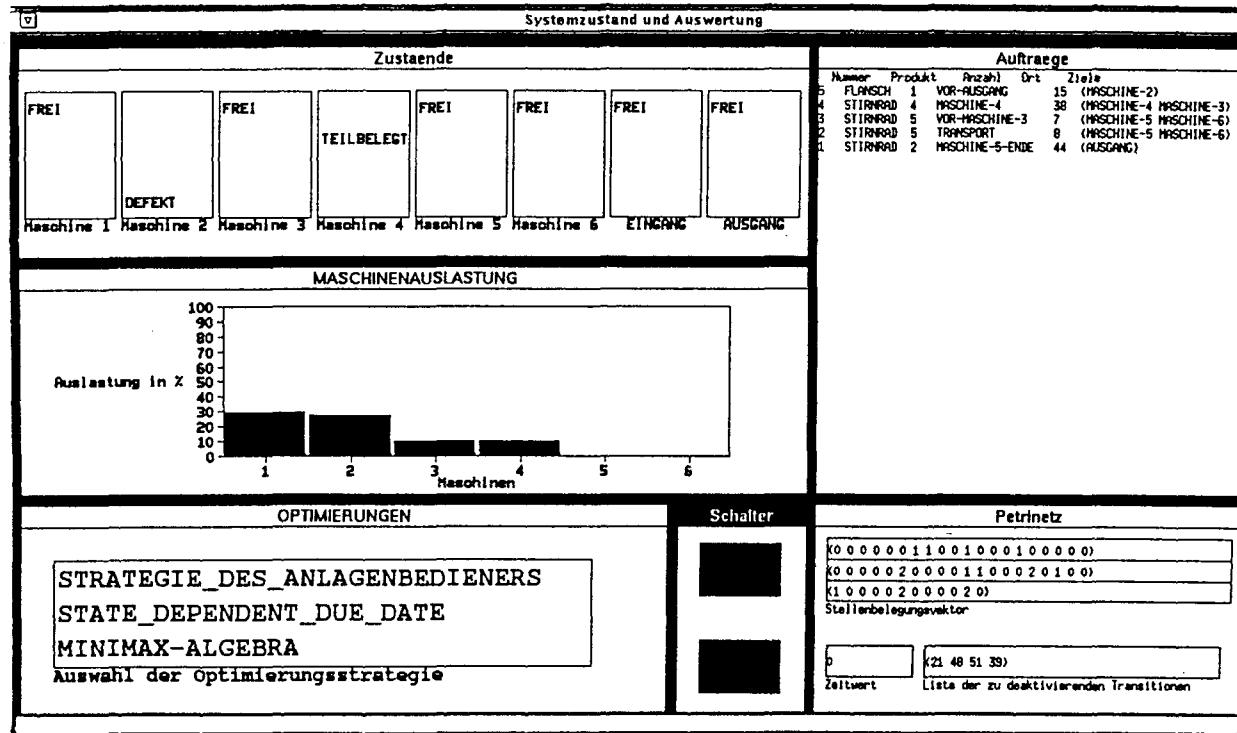
### 3. Wissensbasierter Ansatz zur Planung und Steuerung

Einfache Steuerungsmechanismen, wie sie im vorangegangenen Abschnitt angesprochen wurden, könnten zwar vom Petrinetz als dessen topologischer Bestandteil selbst erbracht werden, jedoch führt bereits eine geringe Zahl einfachster, im Petrinetz einmodellierter (und damit starrer) Entscheidungsfindungen zu einem drastischen Anwachsen von Netzelementen, womit die programmtechnische Beherrschbarkeit der parallelen Prozeßabläufe und die für FFS charakteristische Entscheidungsflexibilität verloren gehen.

Die Behebung einer Konfliktsituation im Petrinetz, wie sie in Bild 2 illustriert ist, kann im erweiterten Sinne als Aktion eines Expertensystems in das PN verstanden werden, womit nun auch der sehr komplexen Steuerungsstruktur des stark vernetzten Fertigungsgesamtsystems Rechnung getragen werden kann. Dem Gedanken der Fertigungsflexibilität folgend, muß dieses Expertensystem neben der aktuellen Netzmarkierung auf Informationen wie Werkstückidentifikation, Produktionsplan, vorgesehener Maschinenpfad (Ablaufolge der Bearbeitung), Bearbeitungszustand etc. zurückgreifen können, die als ständig aktualisierte Informationsprotokolle symbolisch von den Marken getragen werden. Die Marken, die bei den hier verwendeten sog. Stellen-Transitionen-Netzen (S/T-Netzklasse) ununterscheidbare Einheiten sind, werden dazu durch Anwendung der LISP-Routine „Markenidentifikation“ zu jedem Zeitpunkt im PN-System identifiziert, ihr bisheriger Weg liegt dabei stets protokolliert vor und ihr voraussichtlicher Weg, der sich jedoch durch Störungen ändern kann, ist vorherbestimmbar. Auf diese Weise werden die Marken zu Trägern wichtiger Informationen, die für die komplexe Steuerungsstruktur des Gesamtsystems eine entscheidende Bedeutung haben. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, der Klasse der S/T-Netze „treu“ bleiben zu können, und dennoch Mechanismen einzubinden, die bislang der Klasse der Farbigen Petrinetze bzw. der Prädikat-Transitionen-Netze vorbehalten waren. Das hier vorgestellte Verfahren scheint hinsichtlich der Veränderung von Information und damit der Steuerungsstruktur selbst flexibler zu sein. Zudem sind S/T-Netze mit bewährten Konzepten analysierbar, während bezüglich der letztgenannten PN-Klassen Bedenken angebracht sind [1].

Die Steuerung des Fertigungsablaufs des Gesamtsystems wird, wie oben schon erwähnt, über einen wissensbasierten Ansatz auf der Basis der in LISP geschriebenen XPS-Entwicklungsumgebung „Goldworks“ vorgenommen, womit eine programmtechnisch gut realisierbare Interaktion der DEDP-Blöcke „Petrinetz“ und „Planung und Steuerung“ (P&S) aus Bild 1 möglich wird. Das durch die Anforderungen an eine FFS-Steuerung gemäß der Blöcke „PPS“ und „Steuerungsebene“ links in Bild 1 mittlerweile sehr umfangreiche Steuerungssystem würde sich ohne den Einsatz einer Wissensbasierten Komponente kaum so übersichtlich und flexibel strukturieren lassen. In diesem Steuerungssystem sind neben heuristischen Methoden wie Vorbelegungsplanung einschließlich der Bestimmung von Fertigungspfaden, Strategien der Anlagenbediener und Prioritätsregeln wie die im Bereich des Operations Research bewährte „state-dependend-due-date-Regel“ [4], auch analytische Optimierungsmethoden auf Basis

Bild 4:  
Benutzeroberfläche des Steuerungsrechners (Hardcopy).



der Queue-Theorie [5] und der Minimax-Algebra ([6] bis [9]) eingebunden. So kann der Strategie des Maschinen- bzw. Anlagenfahrers ausreichend Rechnung getragen und andererseits der Rechenaufwand für die Optimierung des Gesamtsystems in Anbetracht der kombinatorischen Explosion deutlich reduziert werden.

Die oben angesprochene Interaktion der DEDP-Blöcke „Petrinetz“ und „P&S“ wurde soft- und hardwaretechnisch durch eine entsprechende Interprozeßkommunikation zweier Workstations gelöst, da ein Multi-User-Betrieb auf einem Rechner zu einer Überlastung des Rechnersystems führt. Der erste, die P&S-Ebene repräsentierende Rechner (Steuerrechner), verwaltet das Wissensbasierte System mit dem Steuernetzwerk. Der zweite, die PN-Ebene repräsentierende Rechner verwaltet die in Kapitel 2 angesprochene PN-Simulationssoftware (PN-Rechner). Durch simultane Bildschirmangaben beider Rechner können die synchronen Aktionen der P&S-Ebene kontrolliert werden.

Bild 4 zeigt die Benutzeroberfläche des Steuerrechners [9]. Das Feld „Zustände“ liefert den Status [„FREI“ / „TEILBELEGT“ / „VOLLBELEGT“ / „DEFEKT“] für die 6 Bearbeitungsmaschinen und die Ausgang-/Übergabestation. Die prozentuale Auslastung der Maschinen seit Simulationsbeginn wird in der Graphik „Maschinenauslastung“ wiedergegeben. Im Feld „Aufträge“ werden die Objekte der Auftragsklasse mit einigen ausgewählten Eigenschaften angezeigt, die sich im System befinden. Das Feld „Petrinetz“ zeigt den Stellenbelegungsvektor des Netzes, die Simulationszeit und als Ergebnis des Inferenzmechanismus die Liste der zu deaktivierenden Transitionen an. In dem Menüfeld „Optimierungen“ kann eine von drei implementierten Optimierungsstrategien ausgewählt werden. Durch „Bedienung“ des Schalters mittels Mause Taste wird der Steuerrechner gestartet bzw. gestoppt.

Zur Veranschaulichung der DEDP-Ebene „Realer Fertigungsprozeß“, wird schließlich eine Visualisierung des gesamten FFS in Form eines beweglichen Maschinenmodells (Bild 5) auf einem dritten Rechner realisiert, der in geeigneter Weise von der Steuerung aktiviert wird [9].

#### 4. Simulationsergebnisse

Um Aussagen über die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Optimierungsstrategien treffen zu können, wurden in [9] umfangreiche Simulationen des Fertigungsablaufs durchgeführt, wovon hier ein typisches Beispiel angegeben wird. Dabei wurde entsprechend der Fertigungsanlage nach Bild 5 davon ausgegangen, daß Maschine 1 und 2, 3 und 4 sowie 5 und 6 ersetzend sind. Die Aufträge umfassen die Fertigung von Paletten mit jeweils 5 Stirnrädern, 4 Flanschen, 4 Gehäusen, 5 Kurbelwellen und 5 Radnaben. Transport- und Rüstzeiten sind berücksichtigt; vorgegebene Maschinenprioritäten sind Maschine 1, Maschine 3, Maschine 5. Bild 6 zeigt die Simulationsergebnisse für den Fall, daß keine Störungen während der Auftragsbearbeitung auftreten. Die Verfahrensgüte orientiert sich an der benötigten Gesamtdurchlaufzeit und der erzielbaren Homogenität der Maschinenauslastung. Erkennbar zeigt die analytische Optimierung mittels der Minimaxalgebra bezüglich beider Kriterien Überlegenheit. Wegen der größeren Rechenzeit ist dieses Verfahren jedoch primär für die Vorbelegungsplanung geeignet.



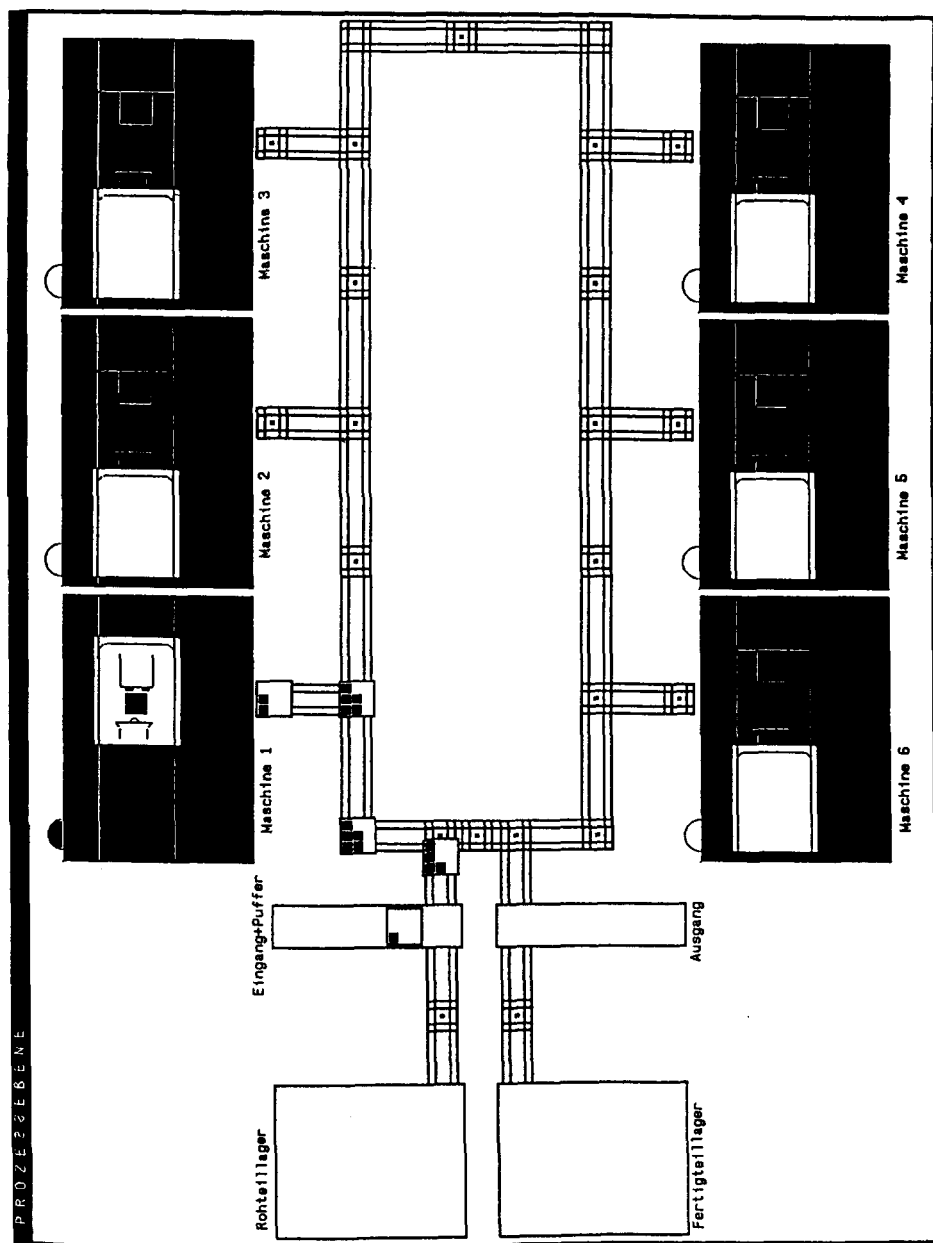


Bild 5:

Bildschirm-Hardcopy des dynamischen Funktionsmodells des realen Prozesses.

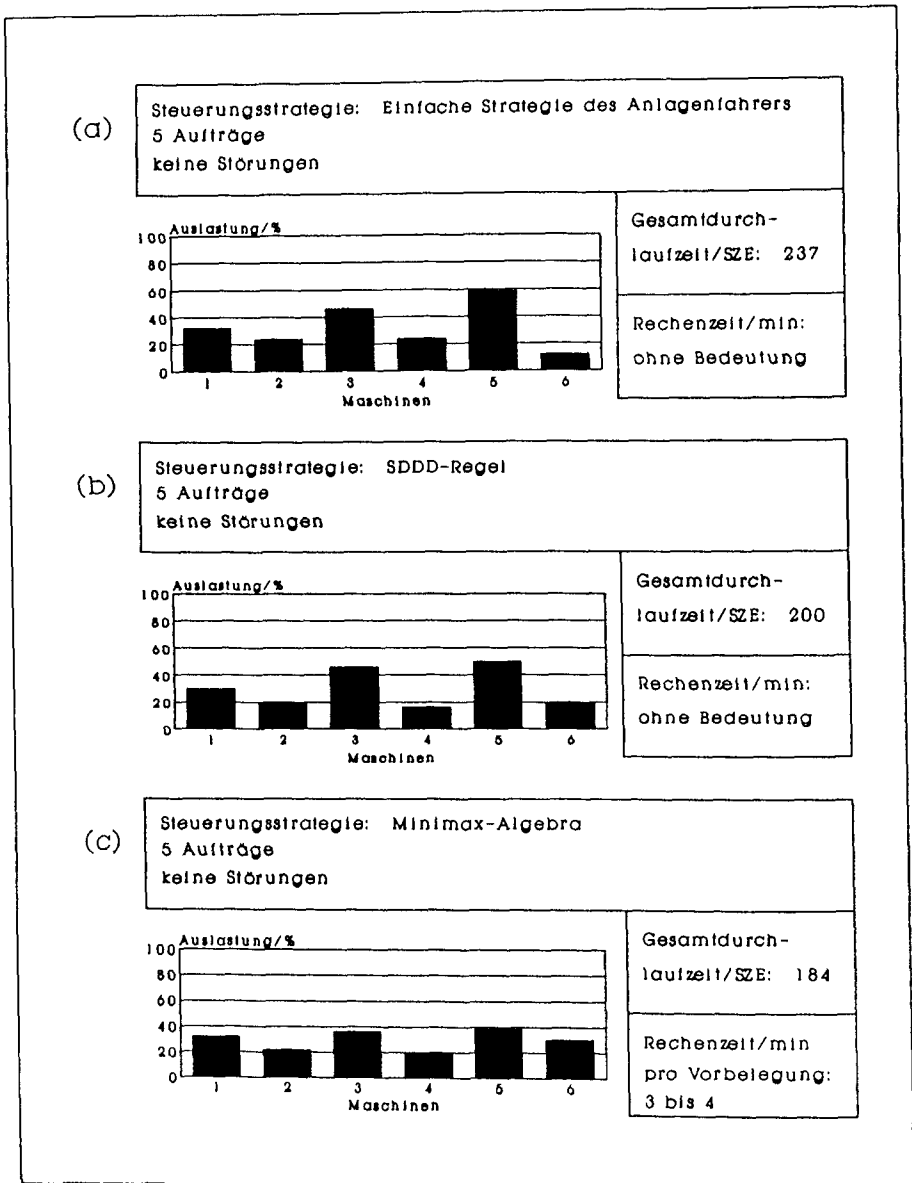


Bild 6:  
Simulationsergebnisse bei Bearbeitung von 5 Aufträgen ohne Störungen.

## 5. Schlußbemerkung

In diesem Beitrag wurde eine Beschreibungsmethodik für diskrete ereignisorientierte dynamische Prozesse, speziell flexible Fertigungssysteme, vorgestellt, die – ausgehend vom klassischen Ebenenmodell der Fertigungssteuerung – eine hierarchisch zeitbewertete Petrinetzstruktur ergänzt um eine wissensbasierte Komponente zur Realisierung und Optimierung der Steuerung umfaßt. Dabei kommen sowohl heuristische Prioritätsregeln zur Maschinenbelegung als auch die analytische Methode der Minimax-Algebra zur Anwendung. Die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Steuerungsstrategien wird beispielhaft anhand von Simulationen demonstriert. Über die Fertigungsproblematik hinaus liegt damit aber ein methodischer Ansatz zur systemtheoretischen Behandlung anderer Prozesse des ereignisdiskreten Typs vor, wie er etwa im Bereich der Versorgung/Entsorgung, Energieverteilung oder Verkehrsflußsteuerung auftritt.

## Literatur

- [1] Abel, D.: Petrinetze für Ingenieure. Springer 1990.
- [2] König, R., Quäck, L.: Petrinetze in der Steuerungs- und Digitaltechnik. Oldenburg 1988.
- [3] Glüer, D., Schmidt, G.: Die Anwendung von Petrinetzen zu Modellbildung, Simulation und Steuerungsentwurf bei flexiblen Fertigungssystemen. at 1988, Heft 12, S. 463–471.
- [4] Conway, R. W., Maxwell, W. L., Miller, L. W.: Theory of scheduling. Addison-Wesley Publishing Company 1967.
- [5] Walrand, J.: Introduction to Queueing Networks. Prentice-Hall 1988.
- [6] Cuninghame-Green, R.: Minimax-Algebra. Lecture Notes in Economics and Mathem. Systems. Springer 1979.
- [7] Cohen, G., Dubois, D., Quadrat, J. P., Viot, M.: A Linear-System-Theoretic View of Discrete-Event Processes and Its Use for Performance Evaluation in Manufacturing. IEEE Trans. Aut. Control, Vol. 30, March 1985.
- [8] Engell, S.: Modelling and on-line scheduling of FFS. IFAC-Symposium „Large scale Systems 89“, Berlin (DDR), Preprints, S. 379–383.
- [9] Rehkopf, A.: Steuerung des ereignisdiskreten Fertigungsablaufs in einer CIM-Zelle unter Einbeziehung heuristischer und analytischer Optimierungsstrategien. Dissertation Universität Karlsruhe 1992.

---

Prof. Dr. V. Krebs  
 Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme der Universität Karlsruhe  
 Kaiserstraße 12 · 76128 Karlsruhe



AXEL MUNACK, Braunschweig

## **Automatisierungstechnik im Dienste einer umweltschonenden Landwirtschaft\***

Im Gegensatz zu Industrie und Gewerbe verlaufen landwirtschaftliche Produktionsprozesse nicht innerhalb geschlossener oder abgrenzbarer Gebäude oder Anlagen. Sie stehen in vielfältigem und direktem Kontakt zur Umwelt: Ökosysteme werden als Produktionsmittel benutzt. Dies gilt vor allem für die Landbewirtschaftung, aber auch für die Tierhaltung, und für diese besonders dann, wenn sie naturnah in bäuerlich strukturierten kleinen oder mittelständischen Betrieben stattfindet. Umweltschonende Landwirtschaft erfordert sowohl eine Analyse als auch die Überwachung, Steuerung und Regelung agrarisch genutzter Ökosysteme, kurz Agrarökosysteme genannt. Im Rahmen der Analyse sind aus diesen Ökosystemen hinausgehende Stoffströme zu erfassen und zu bewerten, auch sind deren mögliche Reduktionen aufzuzeigen.

Eine gezielte Produktion biologischen Materials (Pflanzen oder Tiere) ist ohne einen Eingriff in den Naturhaushalt nicht möglich. Darüber hinaus ist auch die Ernährung der derzeitigen Weltbevölkerung ohne eine Landwirtschaft, die mit einer Vielzahl von technischen und anderen Hilfsmitteln arbeitet, nicht vorstellbar. Zur Gewährleistung einer gleichbleibend guten Produktqualität und einer hohen Produktivität bei Einschränkung des Produktionsrisikos bedient sich der Landwirt dabei einer Anzahl von Stoffen, die er gezielt und bewußt einsetzt: etwa Düngemittel und Pflanzenschutzmittel oder auch Tierarzneimittel. Ein gewisser Anteil dieser Substanzen, dessen Größe von den Anwendungsbedingungen und der Aufwandmenge abhängt, verläßt das Agrarökosystem und führt zu unerwünschten Stoffeinträgen in die Umwelt. Diese direkten Austräge von landwirtschaftlich eingesetzten Mitteln werden im folgenden als Primäremissionen bezeichnet. Allerdings gebieten schon wirtschaftliche Überlegungen, die Stoffe in geringstmöglicher Menge einzusetzen; Ökonomie und Umweltschutz stehen also prinzipiell keinesfalls im Widerspruch.

Eine Optimierung der Anwendungsbedingungen und eine Minimierung der Aufwandmengen erfordern detaillierte Kenntnisse über Wirkungsweise und Verbleib der Mittel. Die vielfältigen Stoffströme in Agrarökosystemen und die komplexen Wechselwirkungen der eingesetzten Stoffe mit organischen und anorganischen Komponenten der Ökosysteme sowie mit den darin lebenden Organismen sind jedoch selbst in der Wissenschaft keineswegs völlig geklärt und für den einzelnen Landwirt schon gar nicht durchschaubar. Es gilt daher, die Forschung über Agrarökosysteme zu intensivieren und das vorhandene Wissen über die Zusammenhänge in geeigneter Weise verfügbar zu machen, so daß letztlich die richtigen Stoffe in der erforderlichen Menge und zum bestmöglichen Zeitpunkt eingesetzt werden können.

---

\* Vortrag vor der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 19. Juni 1992 (Zusammenfassung).

Trotzdem wird landwirtschaftliche Tätigkeit stets auch mit dem unerwünschten Austrag von Stoffen verbunden sein, die erst während des Produktionsprozesses gebildet werden. Als Beispiele für derartige Sekundäremissionen seien hier nur die Ammoniak-Emissionen aus der Tierhaltung oder die Methan-Produktion beim Naßfeld-Reisanbau genannt. Hier muß man versuchen, durch geeignete Maßnahmen – im Falle der Tierhaltung also beispielsweise durch optimierte Klimaregelung in Ställen – die Emissionen möglichst gering zu halten.

Ein weiterer Aspekt ist ebenfalls zu berücksichtigen: Der Landwirt, der seine wirtschaftliche Existenz auf die nachhaltige Nutzung des Agrarökosystems stützt, muß bestrebt sein, die Funktionsfähigkeit des Systems – insbesondere also des Bodens – langfristig zu erhalten und nach Möglichkeit zu verbessern. Dabei sind neben den eigenen Eingriffen auch vielfältige äußere Störungen des Systems (etwa durch Immissionen aus industriellen Produktionsprozessen oder durch Klimaänderungen) zu berücksichtigen.

In dem Vortrag wurden drei Themenbereiche, nämlich

- die Erhaltung der Funktionsfähigkeit landwirtschaftlicher Produktions- und Ökosysteme,
  - die Reduzierung von Stoffeinträgen zur Unterstützung landwirtschaftlicher Produktionsprozesse sowie
  - die Verminderung von Sekundäremissionen aus landwirtschaftlichen Produktionsprozessen
- behandelt.

Dabei wurde einleitend in jeden Themenbereich der landwirtschaftliche Beitrag zur Umweltbelastung erläutert und mit den Belastungen aus anderen Bereichen, also Industrie, Gewerbe, Verkehr, private Haushalte usw. verglichen.

Es zeigt sich sehr deutlich, daß eine umweltschonende Landwirtschaft auf eine Fülle von Meß- und Regelungselementen angewiesen ist. So kann man der Forderung nach einer bedarfsgerechten Düngung und einem an den aktuellen Erfordernissen orientierten Einsatz von Pflanzenschutzmitteln nur nachkommen, wenn der tatsächliche Bedarf durch Messungen, durch Einbeziehung von Daten aus Datenbanken, Vorhersagediensten usw. sowie durch Bilanzrechnungen ermittelt wird und wenn eine genaue Regelungstechnik während des Ausbringvorganges garantiert, daß auch tatsächlich entsprechend der Vorgaben dosiert wird. Eine wesentliche Voraussetzung für die bedarfsorientierte und damit innerhalb eines Schlages differenzierte – also teil-schlagspezifische – Anwendung sowie die entsprechende Bilanzierung zwischen Aufwand und Ertrag bildet die Ortung. Hier ist durch die Entwicklung des Global Positioning Systems (GPS) sowie seinen Ergänzungen in Form des differentiellen GPS eine Möglichkeit eröffnet, die es schon in wenigen Jahren erlauben könnte, entsprechende Komponenten mit einer für die Landwirtschaft ausreichenden Genauigkeit (ca. 10 ... 20 m) zu günstigen Preisen zu erwerben und zu betreiben.

Optische Methoden – sowohl hinsichtlich einer geometrischen als auch einer spektral aufgelösten Bildverarbeitung – werden in zukünftigen Anwendungen wachsende

Bedeutung erlangen. So könnte die mechanische Unkrautbekämpfung eine Renaissance erfahren, wenn es gelingt, Nutzpflanzen von Wildkräutern zuverlässig zu unterscheiden und die Wildkräuter auf nicht-chemischem Wege (oder zumindest durch gezielte Ausbringung chemischer Mittel) zu bekämpfen.

Auch im Bereich der Tierhaltung sind wesentliche Beiträge der Automatisierungstechnik zum Umweltschutz möglich. So läßt sich beispielsweise eine Reduktion der Ammoniak-Emissionen durch geeignete Einzeltier-bezogene Fütterungsstrategien erreichen. Aber auch die Konstruktion der Stallklimatisierung sowie ihr sinnvoll geregelter Betrieb können in erheblichem Maße zur Verringerung der Emissionen beitragen. Dabei schafft die Tieridentifikation die Voraussetzungen für die Bilanzierung der Tiere hinsichtlich der Kraftfutteraufnahme, des Gewichts und – im Falle von Milchvieh – der Milchleistung. Der Regelkreis wird über die rechnerbasierte Ermittlung der maximalen Kraftfuttermenge (Sollwert, off-line) und die Dosierung des Kraftfutters (on-line) für jedes einzelne Tier geschlossen. Neben der adäquaten Gesamt-Kraftfuttermenge läßt sich dabei auch eine Aminosäurezusammensetzung für das Futter so einstellen, daß der Harnstoffgehalt des Urins und damit die Bildung von Ammoniak verringert wird.

Im Falle der Stallklimatisierung haben umfangreiche Computersimulationen aufgezeigt, daß das Strömungsgeschehen im Stall, speziell die Lage von Zirkulations- und Konvektionszonen, sowie die Bedingungen an der Grenzschicht zwischen Einstreu bzw. Boden und Stallluft den Stoffübergang ganz erheblich beeinflussen. Nimmt dieser Zusammenhang eher auf strukturelle Aspekte Bezug, die beim Bau und der Einrichtung von Stallanlagen von Bedeutung sind, so gilt das besondere Augenmerk hinsichtlich der Stallklimaregelung den Zustandsgrößen Temperatur, Luftfeuchte und Luftwechselrate, die ebenfalls so geregelt werden können, daß die Emissionen verringert werden.

Die beiden vorstehenden Anwendungsgebiete aus Pflanzenbau und Tierhaltung demonstrieren im übrigen auch, daß für die Regelung landwirtschaftlicher Prozesse in vielen Fällen noch geeignete Sensoren fehlen. So existieren zuverlässige, robuste und preiswerte sowie on-line einsetzbare Sensoren weder für die Ermittlung des Nährstoffvorrates im Boden noch zur Bestimmung des Nährstoffbedarfs der Pflanze, und auch die Messung der Ammoniak-Konzentration in der Stallluft ist bislang nicht in voll zufriedenstellender Weise möglich.

Zusammenfassend läßt sich ausführen, daß Methoden und Komponenten der Automatisierungstechnik in vielen Anwendungsgebieten und auf unterschiedlichen Ebenen im Bereich der Landwirtschaft eingesetzt werden können, um Beiträge zur Schonung der Umwelt zu leisten:

- auf der systemnahen Ebene zur Erfassung der interessierenden Zustandsgrößen und zur Regelung auf vorgegebene Sollwerte,
- auf der Hof-Managementebene zur Erstellung von Stoffbilanzen und Schädigungsprognosen sowie der daraus abgeleiteten Ermittlung von Sollwerten,

- auf der Planungs- und Entwurfsebene zur Konzipierung umweltschonender landwirtschaftlicher Geräte, Gebäude und Gebäudeeinrichtungen.

Auf allen diesen Ebenen besteht noch ein unterschiedlich hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowie ein erhebliches Realisierungspotential.

---

Prof. Dr.-Ing. Axel Munack,  
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft  
38116 Braunschweig-Völkenrode (FAL)  
Bundesallee 50



WERNER LEONHARD, Braunschweig

## **Zum Stand der autonomen optischen Fahrzeugführung, ein Blick ins PROMETHEUS-Forschungsprogramm\***

### **Einführung und Aufgabenstellung**

Die EG fördert seit einigen Jahren umfangreiche Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Fahrzeug- und Verkehrslenkung mit elektronischen Mitteln, um die in den meisten Industrieländern immer schlimmer werdende Verkehrsnot, vor allem in den Ballungsgebieten zu lindern. Hierzu gehören Navigationssysteme ebenso wie fahrzeug-fahrweg-bezogene Kommunikationsverfahren, um entstehende Verkehrsstaus zu erkennen oder Unfälle, z.B. an Kreuzungen, zu vermeiden. Die meisten Forschungsthemen sind langfristig angelegt, sie werden in den verschiedenen Ländern von der Kraftfahrzeug-Industrie und Forschungsinstituten gemeinsam bearbeitet. In Deutschland hat das Bundesministerium für Forschung und Technologie die Regie übernommen, es bedient sich dabei der Fraunhofer-Gesellschaft als Projektbegleiter.

Im folgenden wird über ein Teilprojekt berichtet, das vom Institut für Regelungstechnik der TU Braunschweig gemeinsam mit der Volkswagen AG bearbeitet wurde [6,7]. Vorhaben mit ähnlichem Ziel sind an verschiedenen Stellen außerhalb und innerhalb des PROMETHEUS-Programmes zu finden, doch stehen dabei meist andere Aspekte im Vordergrund des Interesses [2,4,5,11].

Ziel des Vorhabens „Autonome Fahrzeugführung mit optischem Sensor“ war das automatische Lenken des Fahrzeugs auf autobahnähnlichen Straßen anhand seitlicher Fahrbahnmarkierungen, gewöhnlich ein Seitenstreifen und ein Mittelstreifen. Als Sensor dient eine kleine elektronische Fernsehkamera, die in der Mitte der Windschutzscheibe in Bereich des Rückspiegels fest angebracht ist; die Lenkung erfolgt über einen Stellantrieb, ähnlich wie bei einer herkömmlichen Lenkhilfe. Außer der Fahrzeug-Querführung wurde in einem weiteren Teil des Vorhabens in Zusammenarbeit mit der Ruhr-Universität Bochum auch die autonome Längsführung mit Gaspedal und Bremse als Stellglied untersucht, d.h. eine Geschwindigkeitsregelung bzw. das Folgen eines vorausfahrenden Fahrzeugs; dies ist jedoch nicht Gegenstand dieses Berichtes.

Selbst wenn in absehbarer Zeit alle technischen Probleme einer autonomen Fahrzeugführung mit vertretbarem Aufwand lösbar wären, gäbe es doch andere Gründe, etwa Fragen der Gewährleistung bei Unfällen, die den Einsatz eines Autopiloten in Straßenfahrzeugen in der näheren Zukunft eher unwahrscheinlich machen; dagegen könnte ein automatischer Kopilot, der den Fahrer zwar auf Gefahren aufmerksam macht, ihm aber letztlich die Verantwortung überläßt, einen praktikablen Ansatz darstellen. Um vertrauenswürdige Warnungen etwa beim Einfahren in eine Kurve, abzugeben, müßte der Kopilot allerdings im Prinzip in der Lage sein, das Fahrzeug auch selbst zu lenken.

---

\* Vortrag bei der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 19. Juni 1992.

Die Untersuchungen erfolgten sowohl theoretisch, d.h. durch Rechnersimulation, als auch experimentell, wobei der in Bild 1a skizzierte Kleinbus als Versuchsfahrzeug Verwendung fand.

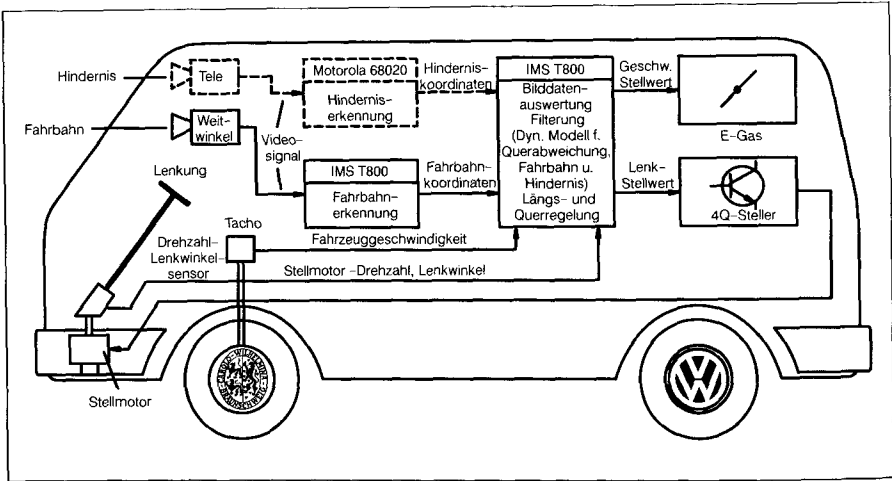


Bild 1a:  
Versuchsfahrzeug

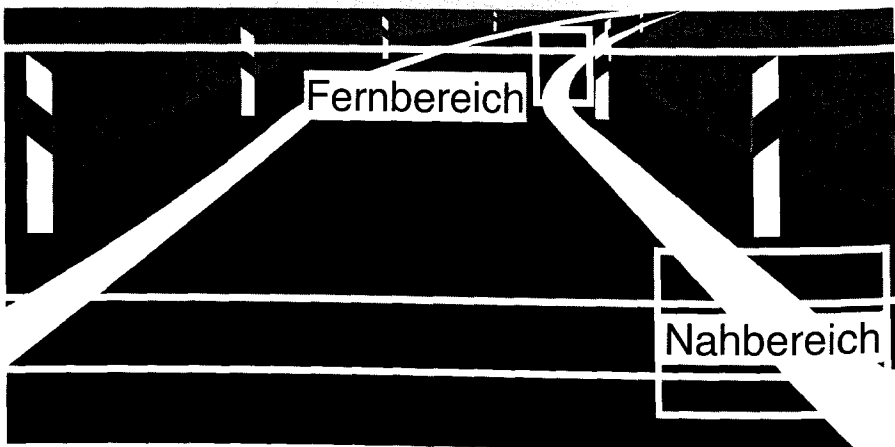


Bild 1b:  
Kamerabild

Die elektronische Kamera für die Seitenführung bildet über ein Weitwinkel-Objektiv den etwa 5–25 m vor dem Fahrzeug liegenden Bereich zweidimensional ab (Bild 1b); die Signale sind nach Fernsehnorm formatiert und liefern alle 40 ms ein volles Bild, dessen Auflösung natürlich durch die Körnung des CCD-Sensors (512 x 512 Pixel) begrenzt und durch unvermeidliche Bewegungen von Kamera und Fahrzeug gestört ist. In einer Entfernung von 25 m beträgt die Auflösung des Sensors etwa 5 cm. Aus der im Rechner gespeicherten Bildfolge mit 256 Grauwerten je Pixel sind nun die der Straßenmarkierung entsprechenden „optischen Kanten“ zu extrahieren. Dies geschieht nach verschiedenen Verfahren der Bildauswertung durch ein Programm, das die interessierenden Bildbereiche definiert und auf Helligkeitskontraste hin analysiert. Die zugehörigen Auswertungsprogramme, bei denen es vor allem auf Störungsunempfindlichkeit und Rechengeschwindigkeit ankam, wurden in einer Nachfolgeinstitution der früheren Akademie der Wissenschaften in Berlin entwickelt [10]. Für die umfangreichen Rechnungen in Echtzeit bei der Bildauswertung, der Transformation von Bild- in Raumkoordinaten, der Berechnung und Interpolation dynamischer Zustände der Fahrzeugbewegung, sowie der Ermittlung des erforderlichen Lenkwinkels, also der Regelung des Fahrzeugs, ist eine erhebliche Rechenleistung erforderlich, die ein Mikrorechnernetz auf der Basis von TRANSPUTER-Modulen bereitstellt. Es sind dies Mikrorechner, die sich dank ihres Aufbaus leicht vernetzen lassen. Alle TRANSPUTER-Knoten arbeiten an physikalisch abgrenzbaren Teilaufgaben parallel und stehen periodisch mit ihren Nachbarknoten in Verbindung. Aus Sicherheitsgründen ist die Regelung so zu gestalten, daß die Lenkung sich jederzeit von Hand übernehmen läßt. Die Fahrversuche überdecken einen Geschwindigkeitsbereich vom Stillstand bis etwa 120 km/h auf Versuchsstrecken. Nachfolgend seien einige Einzelheiten des Vorhabens erläutert.

### **Versuchsaufbau und Lösungsweg**

Für die Regelung stehen außer Fahrzeuggeschwindigkeit (Raddrehzahl) und Lenkwinkel die von der Bildanalyse gelieferten Schätzwerte von Seitenabweichung und Gierwinkelfehler zur Verfügung, die somit als Abtastwerte im Rhythmus der Bildverarbeitung anfallen. Die Bilddaten sind wegen wechselnder Fahrbahnoberflächen, z.B. infolge von Straßenreparaturen, Unterbrechung der Fahrbahnberandung, veränderliche Beleuchtung, ferner auch wegen der nicht berücksichtigten Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeuges stark gestört, so daß vor der weiteren Verwendung eine Filterung unumgänglich ist. Dies gilt insbesondere auch für den Versuch, die Krümmung der weiter vorausliegenden Fahrbahn zu schätzen; für einen menschlichen Fahrer ist dies eine zur Verbesserung der Seitenführung wichtige Größe. Auch der sog. Kurswinkel als Richtung des Geschwindigkeitsvektors des Fahrzeuges und seine Abweichung gegenüber der des Fahrbahn-Randstreifen läßt sich aus der zeitlich diskreten Bildfolge nicht unmittelbar gewinnen. Zur Filterung und Interpolation wird deshalb ein dynamisches „Modell“ der Fahrzeugbewegung relativ zur Fahrbahn, ein sog. Beobachter, fortlaufend berechnet, der die Störsignale reduziert und auch nicht meßbare Größen, etwa den sog. Schwimmwinkel  $\beta$  als Differenz von Kurs- und Gierwinkel, liefert. Das verein-

fachte Fahrzeugmodell in Form von Differentialgleichungen ist in Bild 2 graphisch dargestellt; die Modellgleichungen sind stark von der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_F$  abhängig.  $\delta$  ist der über einen Stellantrieb gesteuerte und als Meßwert verfügbare Lenkwinkel der Vorderräder.

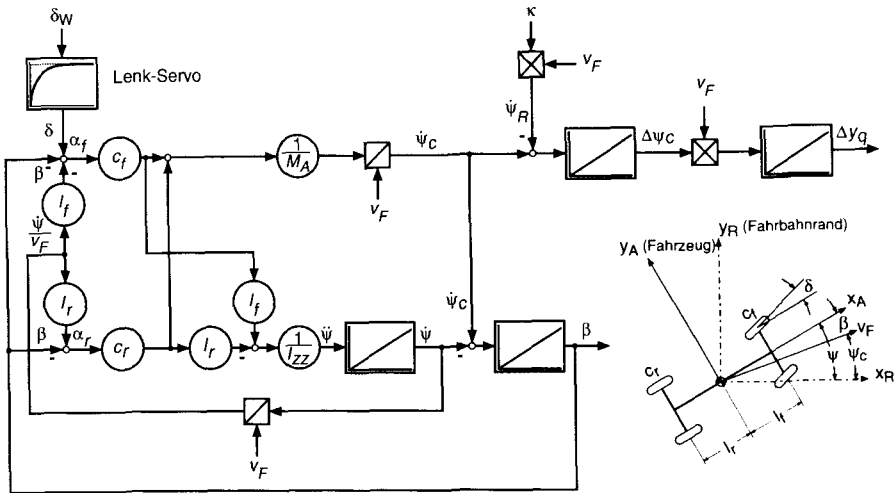


Bild 2:  
Vereinfachtes Fahrzeugmodell

Anhand der verfügbaren Meßwerte ist das in seiner Struktur bekannte Fahrzeugmodell nach Art eines Kalman-Optimalfilters so zu korrigieren, daß ein brauchbarer Kompromiß zwischen Nutzbandbreite und Störampplitude entsteht [1]. Die Koeffizienten des Optimalfilters sind ebenfalls geschwindigkeitsabhängig.

In Bild 3 ist ein Schema der Seitenregelung mit innerem Kurswinkelregelkreis gezeichnet. Wegen der starken Geschwindigkeitsabhängigkeit der Fahrzeugbewegung hat es sich auch hier als notwendig erwiesen, die Parameter des Reglers abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit zu verändern; dies ist nicht überraschend, denn wie man aus eigener Erfahrung weiß, sind bei langsamer Fahrt, etwa beim Einparken, große Lenkradbewegungen zulässig und notwendig, während bei hoher Geschwindigkeit kleinste Drehungen am Lenkrad genügen, um das Fahrzeug von der Fahrbahn abkommen zu lassen.

Die Regler selbst wurden mit Rechner-Unterstützung nach einem neueren Entwurfsverfahren ausgelegt [9]. Alle Echtzeit-Rechenoperationen einschließlich Bildauswertung, Fahrzeugmodell und Regelung laufen auf dem vorher erwähnten TRANSPUTER-Netz ab. Bild 4 zeigt ein Blockschaltbild des gesamten Regelsystems für beide Bewegungsachsen des Fahrzeuges.

Die Umsetzung in das Rechnernetz ist in Bild 5 dargestellt. Eine Einheit T 800 entspricht dabei einem TRANSPUTER-Knoten für Gleitkomma-Rechnungen, der in

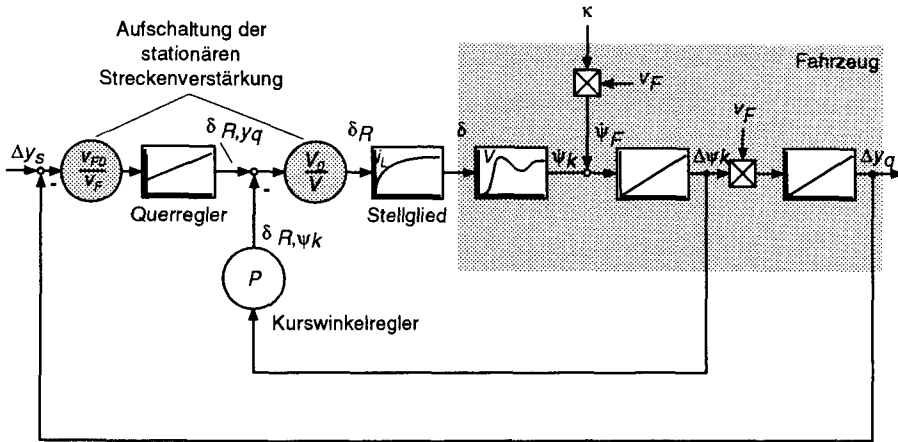


Bild 3:

Zweischleifige Regelung der Seitenbewegung mit innerer Kurswinkelregelung

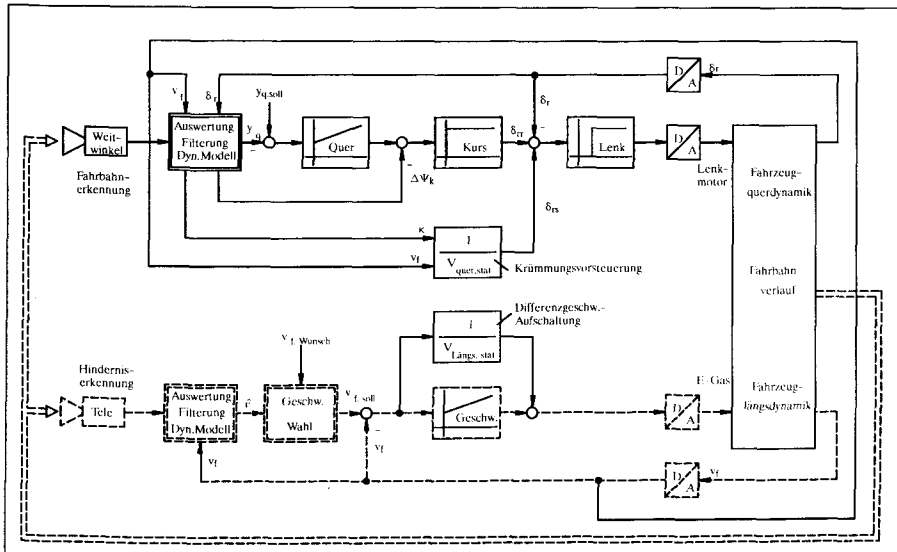


Bild 4:

Blockschaltbild der Fahrzeugregelung

Hochsprache programmiert wird, was die Fehlersuche erleichtert; ein 32 bit Multiplikationsbefehl wird von einer T800 Einheit in etwa  $0,2 \mu s$  ausgeführt. Zwei TRANSPUTER-Knoten sind auf je einer gedruckten Karte im Europa-Format (100 x 160 mm) untergebracht. Das Rechnernetz benötigt eine elektrische Leistung von etwa 80 W und kann aus der Bordstromversorgung gespeist werden.

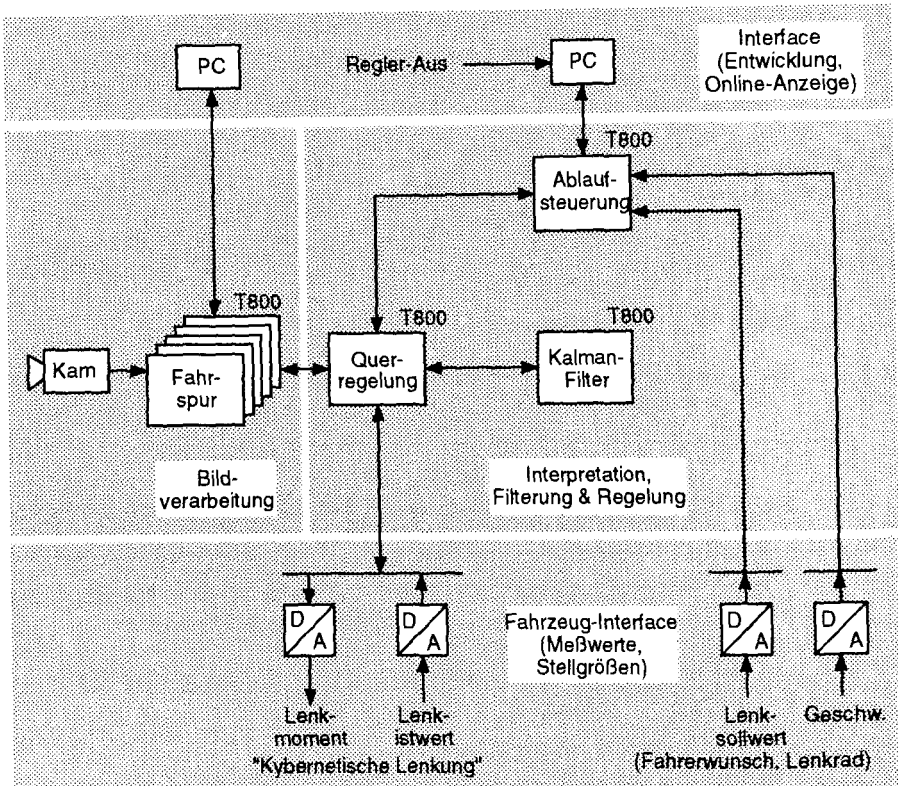
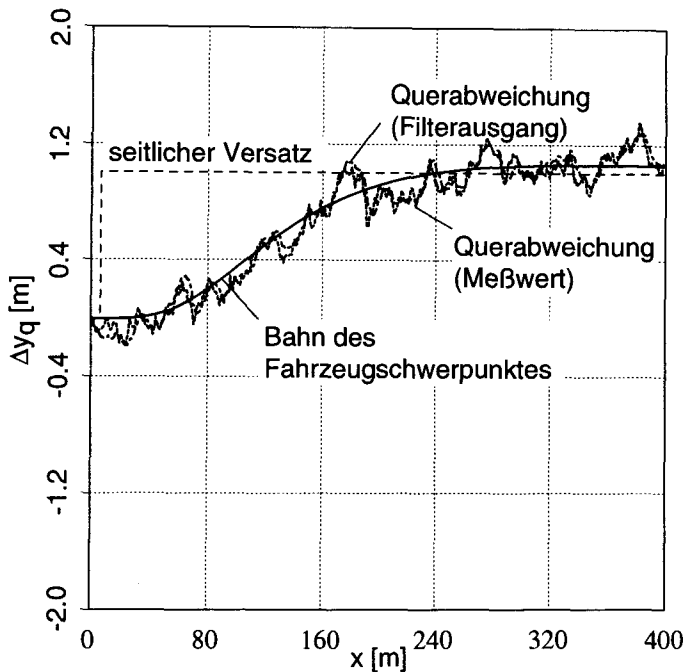


Bild 5:  
Verteiltes Rechnersystem

### Einige Ergebnisse

Wegen des technischen und kostenmäßigen Aufwandes, aber auch der bei Fahrversuchen erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen, wurde das gesamte System einschließlich Fahrzeug, Fahrweg, Signalverarbeitung und Regelung zunächst umfangreichen Simulationstests unterzogen, wobei sämtliche Komponenten und ihr Zusammenspiel durch Rechnermodelle abgebildet wurden. In einem ersten Schritt erfolgte die Simulation „Off-line“ mit dem Programmpaket ACSL und ohne Rücksicht auf den Rechenzeitbedarf. Nachdem die prinzipielle Funktionsfähigkeit nachgewiesen war, wurden die Programme in die TRANSPUTER-Programmiersprache OCCAM für Echtzeitbetrieb umgeschrieben. Der später im Fahrversuch verwendete Rechneranteil war dabei über analog/digitale Schnittstellen mit dem zunächst ebenfalls auf TRANSPUTERN nachgebildeten Systemteil (Fahrbahn, Fahrzeug, Kamera) verbunden. In Bild 6 ist das Ergebnis eines Regelversuchs anhand eines Spurwechsels gezeigt. Der zeitliche Verlauf des Sollwertes für den Seitenversatz  $y_q$  wird dabei durch ein sog. Führungsfilter verschliffen, um heftige Reaktionen des Reglers zu vermeiden, die von Mitfahrenden als unangenehm empfunden würden.



Spurwechsel bei  $v_F = 20$  m/s

Bild 6:

Spurwechsel bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s (Simulation)

In Bild 7a und 7b sind schließlich Ergebnisse von echten Meßfahrten dargestellt, die ein Durchfahren einer leicht überhöhten Kurve mit einem Krümmungsradius von 305 m mit am Beginn und Ende angefügten Klothoiden zeigen; die Geschwindigkeit betrug  $v_F = 17$  ms (61 km/h). Das Fahrzeug ist dabei einmal autonom (Bild 7a) und das zweite Mal (Bild 7b) von einem geübten Fahrer gesteuert. Man erkennt die stark veräuschten Signale, die in beiden Fällen auf gleiche Weise entstanden sind. Es zeigt sich, daß der autonome Regler besser als der Fahrer in der Lage ist, die vorgegebene seitliche Abweichung stationär einzuhalten; allerdings hat der Regler wegen des noch fehlenden Schätzwertes für die vorausliegende Fahrbahnkrümmung Schwierigkeiten, sich beim Ein- und Ausfahren auf die als Störgröße wirkende Krümmungsänderung einzustellen.

Eine Verbesserung des Fahrverhaltens durch Schätzung der vorausliegenden Fahrbahnkrümmung würde eine erhöhte Auflösung des Kamerabildes im Fernbereich erfor-

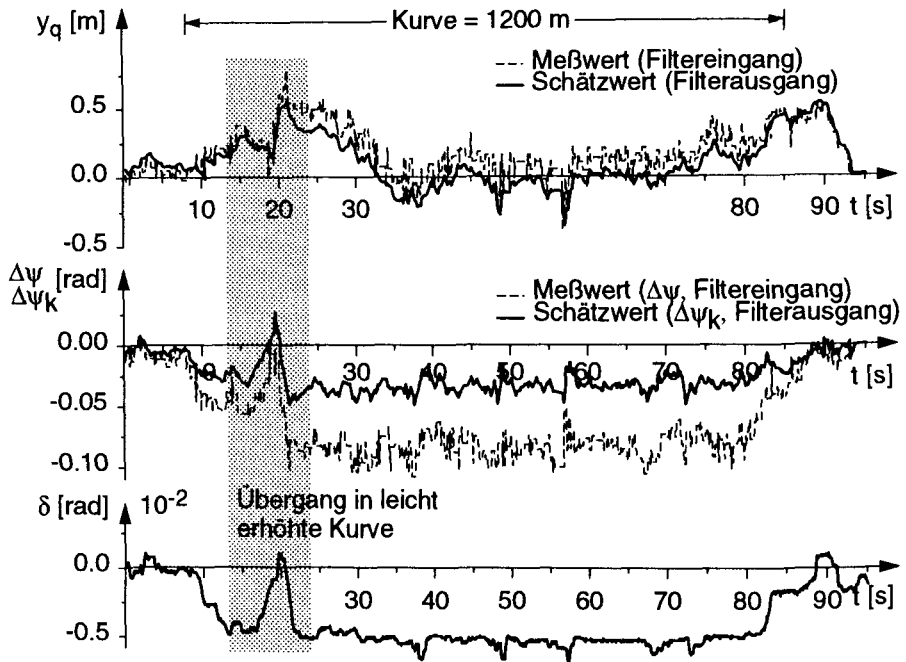


Bild 7a  
Fahrversuche durch eine Linkskurve mit  $v_F = 17$  m/s  
autonome Lenkung

dern. Weitere noch nicht ausreichend untersuchte Einflüsse sind die Seiteneigung und Wölbung der Fahrbahn sowie das Durchfahren von längsgeneigten oder verwundenen Fahrbahnen. Da, wie anfangs erwähnt, der praktische Einsatz solcher Autopiloten in absehbarer Zeit nicht geplant ist und von den meisten Autofahrern wohl auch nicht akzeptiert würde, sind die Arbeiten nach gründlicher Dokumentation zum vorläufigen Abschluß gekommen.

### Zusammenfassung

In dem Bericht werden die Ergebnisse eines im Rahmen des PROMETHEUS-Programmes geförderten Forschungsvorhabens beschrieben, um ein Fahrzeug mit optischem Sensor auf autobahn-ähnlichen Fahrbahnen autonom zu führen. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß das Problem prinzipiell zwar ohne übermäßigen technischen Aufwand lösbar ist, doch sind wichtige Fragen noch offen. Hierzu gehören generelle Nachteile eines optischen Sensors, z.B. bei einer Schneedecke, auf längere Stücke unterbrochene Fahrbahnmarkierung oder Blendung. Auch Fragen der Betriebssicherheit und Redundanz wurden nicht untersucht.



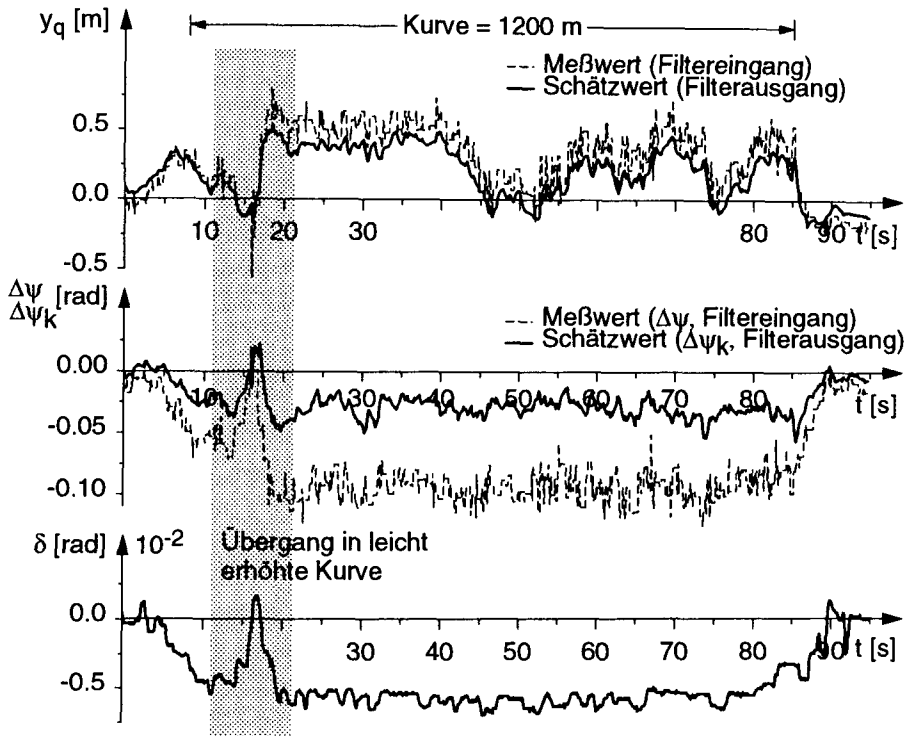


Bild 7b:

Fahrversuche durch eine Linkskurve mit  $v_F = 17\text{ m/s}$   
 Lenkung durch geübten Fahrer

Der Verfasser dankt Herrn Dipl.-Ing. J. Manigel, der die Untersuchungen im Rahmen seiner Forschungsarbeit am Institut für Regelungstechnik ausgeführt hat. Unser gemeinsamer Dank gilt der VW-Forschung, insbesondere den Herren Dr. Rackow, Wilm, Zimdahl und Herrn Weisser, sowie dem BMFT, das durch Bereitstellung der Mittel die Voraussetzungen für diese Arbeiten geschaffen hat.

### Literatur

- [1] Brammer, K., Siffing, G.: Kalman-Bucy-Filter. Oldenbourg Verlag, 1975.
- [2] Dickmanns, E.D., Zapp, A.: A Curvature-based Scheme for Improving Road Vehicle Guidance by Computer Vision. Proceedings of SPIE, Vol. 727, Mobile Robots, pp. 161–168, 1986.
- [3] Doyle, J., Glover, K., Khargonekar, P., Francis, B.A.: State Space Solutions to Standard  $H_2$ - und  $H_\infty$ -Control Problems. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-25, No. 3, 1980.
- [4] Fenton, R.E., Selim, I.: On the Optimal Design of an Automotive Lateral Controller. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 37, No. 2, pp. 108–113, 1988.
- [5] Jurgen, R.K.: Smart cars and highways go global. IEEE-Spectrum, pp. 26–36, May 1991.

- [6] Manigel, J.: Bahnführung eines Straßenfahrzeugs durch Computervision. Zwischenberichte PROMETHEUS-Pro Art, 1989–1992.
- [7] Manigel, J., Leonhard, W.: Vehicle Control by Computer Vision. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 39, 1992, pp. 181–188.
- [8] Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. Band C, Fahrverhalten, Springer Verlag, 2. Aufl., 1990.
- [9] Müller, K.: Ein Entwurfsverfahren für selbsteinstellende, robuste Regelungen. Diss. TU Braunschweig, 1991.
- [10] Winter, H., Bieber, E., Schilling, T.: Fahrspurerkennung und Kurvendetektion. Zwischenberichte PROMETHEUS-Pro-Art, 1991–92.
- [11] Zimdahl, W.: Regelungstechnische Probleme bei dem leitkabelgeführten Kraftfahrzeug. Diss. TH, Darmstadt, 1961.

---

Prof. Dr. Ing. Dr. h.c. Werner Leonhard  
Am Schiefen Berg 32 · W-3440 Wolfenbüttel

## **Ansprache und Bericht des Präsidenten der BWG, Prof. Dr. Gerhard Oberbeck**

Hochansehnliche Festversammlung!

Meine sehr verehrten Damen, meine Herren!

Freunde der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft,  
Kolleginnen und Kollegen!

In den vergangenen – insgesamt sechs – Jahren, in denen ich die Ehre hatte, für die BWG den Jahresbericht erstatten zu dürfen, habe ich immer als eine der wichtigsten Aufgaben jene gekennzeichnet, die uns die Möglichkeit und die Notwendigkeit bescherte, mit den Wissenschaftlern unserer Kulturregion des gesamten nördlichen Harzvorlandes und des Harzes zusammenarbeiten zu können. Halle, Magdeburg und Leipzig waren für uns – trotz der innerdeutschen Grenze – immer Nachbarstädte. Noch vor einem Jahr skizzierte ich Zeichen neuer Perspektiven und tätigen Aufbruchs, die sowohl Politiker wie Wissenschaftler, ja jeden einzelnen Bürger in Spannung versetzen und zu mitwirkender Tätigkeit herausfordern mußten.

Und heute? Die Stimmung eines relativ grauen Alltags scheint zu dominieren. Ernüchterung statt Euphorie, Enttäuschung, Lethargie und Schuldzuweisungen – ist das wirklich unser derzeitiger psychischer Zustand? Ich meine, dies ist und kann nicht – bei aller Sachlichkeit – eine allgemein gültige Aussage sein.

Für uns, d. h. die Mitglieder der BWG, ist jedenfalls herauszustellen, daß zwei große internationale Symposien zu bemerkenswerten Ergebnissen geführt haben, nämlich jene in Halberstadt und in Clausthal stattgefundenen, auf die ich im einzelnen näher eingehen werde. Unsere persönliche Leitlinie für diese vergangenen zwölf Monate war die Besinnung, ja Rückbesinnung auf die endogenen, d. h. die uns inwohnenden, eigenen wissenschaftlichen und organisatorischen Kräfte.

Diese Gedanken bewegen mich besonders hier in Braunschweig, dem Sitz unserer Gesellschaft und für viele von uns auch Vaterstadt, jener Stadt, die 1947 ihre Hauptstadtfunktion des Freistaates Braunschweig verlor und die in den folgenden Jahrzehnten, am Rande der alten Bundesrepublik gelegen, einen beträchtlichen wirtschaftlichen Niedergang, so z. B. auf den Sektoren des Fahrzeug- und Maschinenbaus, der optischen Industrie sowie der Nahrungsmittelindustrie (Konserven- und Zuckerfabriken), zu verzeichnen hatte.

Die zentrale Lage im heutigen Deutschland berechtigt – aus planerischer Sicht – zu der Aussage, daß in Zukunft die Bedeutung der Stadt nur zunehmen und die wirtschaftliche Lage sich mit Sicherheit verbessern wird. Jedoch: ohne Geduld und Zuversicht der Menschen geht es nicht!

Von der Stadt Braunschweig begrüße ich unseren Oberbürgermeister Herrn *Steffens* und von der Stadtverwaltung Frau Stadträtin Prof. Dr. *Pollmann*. Ich bedanke mich bei dieser Gelegenheit bei Ihnen für Ihr Interesse an der Arbeit der BWG und gleichzeitig

dafür, daß wir zum heutigen Anlaß, wie so oft schon, in diesen schönen Räumen zu Gast sein dürfen.

Ich freue mich, Herrn Innenminister a.D. *Bennemann* willkommen heißen zu dürfen. Ebenso gilt meine Aufmerksamkeit den Vertretern der politischen Parteien, der Kammern, der Wirtschaft und der Bundes- und Landesbehörden, unter diesen besonders dem Präsidenten des Landesrechnungshofes, Herrn *Herbst*, und dem stellvertretenden Direktor des Arbeitsamtes, Herrn *Brandt*, ferner den Vertretern der städtischen Behörden und der Gewerkschaften, unter ihnen dem Direktor des Stadtarchivs, Herrn Dr. *Garzmann*, nicht zuletzt auch dem Fernsehen, dem Rundfunk und der Presse.

Mit ganz besonderem Dank für die großzügige Förderung der BWG begrüße ich als Vertreter der Stiftung Volkswagenwerk Herrn Staatssekretär a.D. *Möller*.

Mit Herzlichkeit heiße ich die Kollegen aus der Wissenschaft willkommen, denen wir uns eng verbunden fühlen. Unter uns sind: der Vizepräsident der PTB, Herr Prof. Dr. *German*, der Präsident der FAL, Herr Prof. Dr. *Ellendorff*, die Vertreterin des Direktors des Landesmuseums, Frau Oberkustodin Dr. *Wiswe*.

Ganz besonders freue ich mich, als Vertreter der Rheinisch-Westfälischen Akademie der Wissenschaften, Düsseldorf, ihren Präsidenten Herrn Prof. Dr. *Schadewaldt*, als Vertreter der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig ihren Präsidenten Herrn Prof. Dr. *Haase*, und als Vertreter der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen ihren Vizepräsidenten Herrn Prof. Dr. *Grauert* begrüßen zu können. Als Vertreter der Joachim-Jungius-Gesellschaft, Hamburg, begrüße ich ihren Präsidenten Herrn Prof. Dr. *Seifert*. Zu all den Genannten hat sich in den letzten Jahren ein persönlicher und herzlicher Kontakt entwickelt.

Erfreulich eng ist die Verbindung der BWG mit den anderen Universitäten unseres niedersächsischen Raumes, mit Göttingen, Hannover und Clausthal, schon durch die Mitglieder aus ihren Reihen. Darum gilt mein besonderer Gruß dem Präsidenten der Universität Georgia Augusta, Herrn Prof. Dr. *Kamp*, dem Präsidenten unserer Technischen Universität Braunschweig Carolo Wilhelmina, Herrn Prof. Dr. *Rebe*, dem Rektor der Hochschule für Bildende Künste Braunschweig, Herrn Prof. *Welzel*.

Schließlich freue ich mich, auch die Referenten unserer heutigen Vormittagsveranstaltung begrüßen zu können. Es sind dies Herr Prof. Dr. *Krebs*, Stuttgart, Herr Prof. Dr. *Munack*, Braunschweig, und Herr Prof. Dr. *Leonhard*, Braunschweig.

Ich danke Ihnen zugleich für Ihre freundliche Bereitschaft, unseren heutigen Preisträger, Herrn Prof. Dr. *Gilles*, durch Ihre wissenschaftlichen Beiträge besonders zu ehren.

Schließlich möchte ich alle ordentlichen und korrespondierenden Mitglieder der Braunschweigischen Gesellschaft willkommen heißen sowie alle Damen und Herren, die uns seit langen Jahren ihr Interesse schenken.

Meine Damen und Herren!

Es gehört zur Tradition wissenschaftlicher Gremien, einmal im Jahr vor der Öffentlichkeit Rechenschaft abzulegen über Forschungsergebnisse, bemerkenswerte Veranstaltungen, Veröffentlichungen sowie Vorgänge im Mitgliederstand.

Mein Bericht erstreckt sich auf die Zeit von der letzten Feierlichen Jahresversammlung, also vom 14. Juni 1991, bis heute.

Während dieser Zeit hatte unsere Gesellschaft vier Todesfälle zu beklagen:

Am 03.10.1991 verstarb Prof. Dr. Stefan *Schottlaender* im Alter von 63 Jahren, ordentliches Mitglied der BWG seit 1976. Herr *Schottlaender* war ordentlicher Professor und Direktor des Instituts für Mathematik der TU Clausthal. Er zeichnete sich durch zahlreiche Veröffentlichungen aus den Gebieten der Funktionstheorie, der Regelungstheorie und der Reihenentwicklungen spezieller Funktionen sowie der impliziten Funktion aus. Er war Mitglied der Deutschen Mathematiker-Vereinigung, der Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik sowie Vorsitzender des Landesverbandes Niedersachsen im Hochschulverband. Vom 01.01.1989 bis zu seinem Tode war er Klassenvorsitzender der Klasse für Naturwissenschaften und Mathematik der BWG.

Am 14.05.1992 verstarb Prof. Dr. Rudolf *Schmitz*, korrespondierendes Mitglied der BWG seit 1979. Herr *Schmitz* war bis zu seiner Emeritierung Ordinarius am Institut für Geschichte der Pharmazie der Universität Marburg. Er war Mitglied in vielen wissenschaftlichen Institutionen und Inhaber zahlreicher in- und ausländischer Ehrungen.

Am 19.05.1992 verstarb im 62. Lebensjahr Prof. Dr.-Ing. habil. Alfred *Führböter*, ordentliches Mitglied der BWG seit 1989. Herr *Führböter* war ordentlicher Professor und Direktor des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig und ein herausragender Fachexperte der Hydromechanik und des Küstenwasserschutzes. Er hat den großen Wellenkanal in Hannover mitgeschaffen und auf seinem Fachgebiet zahlreiche wissenschaftliche Beiträge veröffentlicht. In zahlreichen wissenschaftlichen Gesellschaften und Institutionen hat er als Mitglied aktiv mitgearbeitet.

Am 06.06.1992 verstarb im Alter von 82 Jahren Prof. Dr.-Ing. Theodor *Rummel*, ordentliches Mitglied der BWG seit 1969. Herr *Rummel* war bis zu seiner Emeritierung Lehrstuhlinhaber für Elektrowärme und Direktor des gleichnamigen Instituts an der Universität Hannover. Er zeichnete sich durch zahlreiche Veröffentlichungen auf seinem Fachgebiet aus und war Inhaber vieler Patente sowie Mitglied deutscher und internationaler wissenschaftlicher Organisationen und Gesellschaften.

Sie haben sich zu Ehren der Verstorbenen erhoben; – ich danke Ihnen.

Am 13. Dezember 1991 wählte das Plenum der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft in der Wahlversammlung drei ordentliche Mitglieder:

in die Klasse für Naturwissenschaften und Mathematik

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Helmut *Braß*,

Univ.-Professor an der TU Braunschweig, Abt. Numerische Mathematik,

Herrn Prof. Dr. rer. nat. H. D. *Ehrich*,

Univ.-Professor an der TU Braunschweig, Abt. Datenbanken;

in die Klasse für Geisteswissenschaften

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Cord *Meckseper*,

Univ.-Professor an der Universität Hannover, Institut für Bau- und Kunstgeschichte

und vier korrespondierende Mitglieder:

in die Klasse für Naturwissenschaften und Mathematik

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hans *Bürger*, Wuppertal;

in die Klasse für Bauwissenschaften

Herrn Prof. Dr.-Ing. W. B. *Krätzig*, Bochum;

in die Klasse für Geisteswissenschaften

Herrn Prof. Dr. Raymond *Klibansky*, Oxford und Montreal,

Herrn Dr. Philipp P. *Fehl*, Illinois (USA).

Somit zählt heute die BWG 121 ordentliche Mitglieder. Davon sind 45 über 70 Jahre alt. Sie werden auf die in der Satzung festgelegte Höchstzahl von 110 Mitgliedern nicht angerechnet.

Außerdem zählt die BWG 63 korrespondierende Mitglieder.

Die Tätigkeit der BWG im vergangenen Jahr sei wie folgt charakterisiert:

Es fanden im Plenum acht wissenschaftliche Sitzungen statt, wobei folgende Themen behandelt wurden:

Das Apostelamt des Petrus im Urteil des Apostels Paulus – ein neutestamentlicher Vortrag zu einem ökumenischen Problem

Computational Mechanics der Kontinua und Strukturen

Die Wasserversorgung des antiken Pergamon

Die Entstehung der Nationen und das mittelalterliche Reich

Forschungsarbeiten des Laboratoriums für Informationstechnologie

Bestrebungen zur Errichtung einer Technischen und Montanistischen Hochschule (Kraft und Stoffe) in Braunschweig in den Jahren 1939 und 1943

P. P. Rubens: Die Rolle eines Skizzenstils für die Entwicklung seiner Malerei

Erinnerung an Ferdinand Gregorovius.

In den Sitzungen der vier Klassen wurden folgende fachwissenschaftlich enggefaßte Themen behandelt:

Zwei Aspekte von Zellularautomaten

Synergetik: von der Musterbildung zur Mustererkennung

Zur Verwendung pflanzlichen Baumaterials in Prähistorie und Historie – ein Beitrag zur Umweltrekonstruktion

Vereinfachtes Modell zum CO<sub>2</sub>-Kreislauf in der Atmosphäre und in den Weltmeeren

Der Utrecht-Psalter und seine Neudatierung

Alkibiades I – Platon oder nicht Platon.

Schließlich sollen im Zusammenhang mit den wissenschaftlichen Aktivitäten noch vier öffentliche Vorträge erwähnt werden, die vor einem Jahr die Jahresversammlung wissenschaftlich begleiteten.

Es sprachen damals:

Herr Prof. Dr. E. *Ramm*, Stuttgart  
über „Beulen Betonschalen?“,

Herr Prof. Dr. H. *Rothert*, Hannover  
über „Zur Berechnung und Konstruktion von Türmen und Schornsteinen in Stahlbetonweise“,

Herr Prof. Dr. H. *Bachmann*, Zürich  
über „Dynamische Sanierung von Bauwerken mit menschenerregten Schwingungen“  
und

Herr Prof. Dr. G. *Schuëller*, Innsbruck  
über „Stochastische Strukturmechanik – Entwicklungen und Perspektiven“.

Termingerecht zur Jahresversammlung ist die Drucklegung des Jahrbuches 1991 abgeschlossen worden; es hat jedoch einige technische Probleme gegeben, so daß sich der Versand verzögern wird.

Über die Aktivitäten der Kommissionen ist folgendes zu berichten:

#### 1. Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunstgeschichte

Unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. *Gosebruch* und Herrn Prof. Dr. *Ullmann*, Universität Leipzig, fand der Zeit vom 7. bis zum 10.10.1991 in Halberstadt ein Symposium mit dem Thema „Königtum und Kirche als Kulturträger im östlichen Harzvorland“ statt.

Zahlreiche Wissenschaftler aus dem In- und Ausland haben mit Vorträgen zum Erfolg dieser Veranstaltung beigetragen.

Die Beiträge werden im Rahmen der Schriftenreihe der Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunstgeschichte veröffentlicht.

#### 2. Kommission „Technik und Umwelt“

Die Kommission hat am 30.10.1991 unter dem Vorsitz von Herrn Prof. Dr.-Ing. R. *Jeschar* im Institut für Energieverfahrenstechnik der Technischen Universität Clausthal-Zellerfeld getagt.

Als Tagesordnungspunkte sind neben Formalien und einem Überblick über die Akademien der Bundesrepublik Deutschland vor allem die zukünftigen Arbeitsschwerpunkte der Kommission behandelt worden. Dabei galt der möglicherweise anthropogen bedingten Klimabeeinflussung das Hauptinteresse. Trotz der teils kritischen Betrachtungen der prognostizierten Klimaentwicklung war der Konsens der Kommission, daß sich die Ingenieure zukünftig vermehrt mit der CO<sub>2</sub>-Problematik auseinandersetzen müssen, um technische Lösungen anbieten zu können.

Unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. *Jeschar* fand am 21./22. Mai 1992 in Clausthal-Zellerfeld ein wissenschaftliches Symposium zum Thema „Technische Möglichkeiten zur Minderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes“ statt.

Ziel dieses Symposiums war die interdisziplinäre Diskussion sowie die verstärkte Anregung einer Zusammenarbeit zwischen den Fachbereichen der Natur- und Ingenieurwissenschaften unter Einbeziehung der Industrie. Der thematische Schwerpunkt des ersten Tages betraf die anthropogen bedingte Kohlendioxidproblematik (Kohlendioxidkreislauf, mögliche Klimaentwicklungen etc.). Am zweiten Tag des Symposiums wurden verfahrenstechnische Umsetzungsmöglichkeiten der CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale (rationelle Energieanwendung; Einsatz neuer Kraftwerksgenerationen, z. B. Gas/Dampf-Turbinen-Kraftwerke; Deponierung von CO<sub>2</sub> in der Tiefsee; Einbindung von Kohlendioxid in Biomasse) diskutiert.

Das Interesse an diesem Symposium erwies sich als erfreulich: es nahmen 50 Personen aus verschiedenen Fachbereichen teil, so daß für die Zukunft weitere Veranstaltungen in diesem Rahmen geplant sind.

### 3. Kommission „Technik und Recht“

Die konzipierten Programme wurden in einigen Sitzungen gestrafft und diskutiert.

Die Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen unserer Erde ist die bisher größte Herausforderung für die Menschheit. Wir alle tragen Verantwortung für die Zukunft der „Einen Welt“, in der wir gemeinsam leben.

Auch Mitglieder der BWG widmen sich intensiv der Diskussion über wissenschaftliche, technische und industrielle Errungenschaften und ihre Auswirkungen: die menscheitsgefährdenden Entwicklungen sind vielfach eine Folge des ungehemmten Gebrauchs der modernen Technik. Anzustreben ist ein Energiekonzept, das die Möglichkeiten zur Verminderung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen berücksichtigt. Zu diesem Problemkreis fand – wie erwähnt – unter Organisation und Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. *Jeschar* am 21./22. Mai 1992 ein Symposium in Clausthal statt.

In all den Auseinandersetzungen um unsere turbulente Außenwelt, um das Geschehen um uns herum, steht der Wissenschaftler. Aber welch' Unterschied besteht zwischen dem Wissenschaftler, wie ihn Schiller in seinem „Spaziergang“ noch schilderte, und den Forschern in heutiger Zeit! Schiller charakterisierte:

„Aber im stillen Gemach entwirft bedeutende Zirkel  
sinnend der Weise,  
beschleicht forschend den schaffenden Geist,  
prüft der Stoffe Gewalt,  
der Magnete Hassen und Lieben,  
folgt durch die Lüfte dem Klang,  
folgt durch den Äther dem Strahl,  
sucht das vertraute Gesetz in des Zufalls grausenden Wundern,  
sucht den ruhenden Pol in der Erscheinungen Flut.“



Heute steht der Wissenschaftler nicht im Abstand zur Welt, sondern in der Brandung ihrer Deutungsversuche. Was ihm gelingen muß, ist die Balance, ist das aus der differenzierten Kenntnis der Gesetzmäßigkeiten geglückte Zusammenspiel von Natur und Technik.

Mit jeder zusätzlichen oder erweiterten Spezialisierung, mit vermehrter Kenntnis und damit auch Machterweiterung durch Erweiterung des Machbaren aber wächst die Bürde der dem Menschen auferlegten Verantwortung; denn es geht nicht mehr allein um die *Erkenntnis* komplexen Geschehens in unserer Welt allein, sondern um die Bedrohung, daß das nächste Opfer falscheingesetzten menschlichen Handelns und Wirkens in und mit der Natur *der Mensch selbst* ist.

So bekommt Forschung, so bekommen die Erwartungen an den Wissenschaftler eine neue Blickrichtung, eine neue Dimension, die noch dadurch zusätzliche Akzente erhält, daß wir viel schneller als je zuvor auf neue Erkenntnisse reagieren müssen, also unter Zeitzwang geraten.

Konvergentes und divergentes Denken, d. h. Intelligenz und Kreativität müssen zusammenwirken, um für die Gegenwart und Zukunft Fortentwicklung und Ausgewogenheit in ihrer Anwendung sicherzustellen.

Der Wissenschaftler unserer Zeit kann sich bei seiner Suche nach der Wahrheit nicht nur auf Methoden und Analysen des eigenen Fachgebietes beschränken, er braucht zur Einordnung den Blick in die anderen Disziplinen, um auch im eigenen Bereich Akzente setzen zu können, Interpretationen zu ermöglichen. Hierin besteht das zentrale Anliegen, dem Wissenschaftliche Gesellschaften und Akademien der Wissenschaft heute mehr denn je ein Podium, eine Heimstätte und ein Auditorium bieten müssen, – ein Anliegen, das zugleich die Bedeutung dieser Institutionen steigert und aktualisiert: Anzustreben ist nicht nur das Wissen um die Erkenntnisse innerhalb der unterschiedlichen Disziplinen, sondern ihr konzeptionelles Zusammenspiel trotz vorliegender Wechselwirkungen.

Insonderheit im Dualismus zwischen Natur und Technik muß es verpflichtendes Ziel sein, bei der Nutzung der verfügbaren Kräfte und Ressourcen zur Harmonie, d. h. zu verantwortlicher Ausgewogenheit zwischen den natürlichen Gegebenheiten und dem Einsatz des intellektuell-technisch Machbaren zu gelangen.

Zum Abschluß meiner Ausführungen sei es mir erlaubt, unseren staatlichen, städtischen und privaten Förderern zu danken; besonders handelt es sich um das Land Niedersachsen und um die Stadt Braunschweig. Materielle Güter bilden die Basis; Sympathie und menschliche Wärme steigern die Leistungsfähigkeit und die Kreativität. Wir haben den Eindruck, daß wir in den Mauern dieser Stadt wohlgekommen sind. Dafür sind wir dankbar.

Zum Schluß möchte ich den Mitgliedern des Orchesters unseres Staatstheaters sehr herzlich danken für ihre Mitwirkung und die musikalische Begleitung. Ich fühle mich Ihnen insofern besonders verbunden, habe ich doch vor 50 Jahren – und dies sei etwas außerhalb des Protokolls gesagt – als 15jähriger Schüler als Statist auf den Brettern, die die Welt bedeuten, gewirkt: für eine Gage von 50 Pfennig mit einer halben Freikarte pro Abend.



**Laudatio**  
**zur Verleihung der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille**  
**an Prof. Dr.-Ing. E.-D. Gilles**  
**Universität Stuttgart**

Von **Manfred Thoma**

Herr Präsident, meine Damen und Herren,

es ist mir eine Freude und Ehre zugleich, Ihnen den heutigen Preisträger der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille vorzustellen. Ich tue das besonders gern, da ich Herrn Prof. Dr.-Ing. E.-D. Gilles seit seinem Studium der Elektrotechnik in Darmstadt kenne. Bereits im Rahmen seiner Diplomarbeit, die ich betreute, beschäftigte er sich mit dem interdisziplinären Gebiet der Regelung von chemischen Prozessen. Dieses durch ihn selbst initiierte Thema macht deutlich, daß Herr Gilles bereits zu diesem Zeitpunkt klare Vorstellungen über sein Interessengebiet besaß.

Meine Damen und Herren, lassen Sie mich ein wenig von dem Thema abkommen und einige Bemerkungen zur (Universitäts-)Ausbildung machen. Das höchste Gut einer Nation ist eine hervorragende Ausbildung junger Menschen in allen Ebenen. Bei einer Industrienation hängt sie im besonderen Maße davon ab, neben dem durchschnittlich begabten auch dem besonders begabten Studenten eine hervorragende Ausbildung zu vermitteln. Hier ist bei uns so manches im Argen. Der Preisträger ist ein ausgezeichnetes Beispiel dafür, daß es für eine erfolgreiche Tätigkeit sehr wichtig ist, schon frühzeitig Eigeninitiative zu entwickeln.

Da nicht alle Anwesenden mit dem Fachgebiet der Regelungstechnik vertraut sind, möchte ich einige Bemerkungen hierzu machen. Es handelt sich bei der Regelungstechnik um ein relativ junges, eigenständiges Wissensgebiet, obwohl Regelungsvorgänge mindestens so alt sind, wie Organismen leben. Auch der Mensch kann nicht ohne ständig ablaufende Regelungsvorgänge existieren. Ein Beispiel hierzu ist die Regelung des menschlichen Blutkreislaufes. Dabei spielen, wie auch im technischen Bereich z. B. bei der Raumtemperaturregelung, rückgeführte Strukturen (Regelkreise) eine fundamentale Rolle, die in der Lage sind, einwirkende Störungen auszugleichen. So treten z. B. bei erhöhter körperlicher Betätigung Störungen im Blutkreislauf auf, die u. a. einen erhöhten Sauerstoffbedarf und damit eine beschleunigte Blutzirkulation bewirken; bei der Raumtemperaturregelung sind die Störungseinflüsse im wesentlichen durch auszuregelnde Kälteeinwirkungen charakterisiert. Allgemein spricht man bei geregelten technischen Vorgängen auch von der Automatisierungstechnik.

Der Regelungstechnik kommt somit eine grundlegende (Struktur-)Eigenschaft zu, die heute praktisch alle Lebensbereiche beeinflusst. Dabei geht es nicht nur um einen Entwurf einer geeigneten Regelung, sondern auch um die gleichzeitige Optimierung, wie z. B. ein minimaler Energieverbrauch bei dynamischen Prozessen.

Diese Vorgehensweise führte in jüngster Zeit auf den Einsatz von (Echtzeit-)Hochleistungsrechnern und damit zu einer engen Verzahnung der Automatisierungs- und der Informationstechnik.

Nach diesen Abschweifungen darf ich Ihnen Herrn Gilles, geboren am 16. Mai 1935, vorstellen. 1968 wurde er auf das Ordinariat für Meß- und Regelungstechnik berufen und gleichzeitig zum Direktor des Institutes für Systemdynamik und Regelungstechnik der Fakultät für Verfahrenstechnik an der Universität Stuttgart ernannt.

Nach der obligatorischen Schulausbildung mit Reifeprüfung 1954 studierte Herr Gilles von 1954 bis 1960 Elektrotechnik mit Schwerpunkt Regelungstechnik an der Technischen Hochschule Darmstadt. Er fertigte eine gemeinsam von den beiden Instituten für Technische Chemie und Regelungstechnik betreute Diplomarbeit an, die sich mit Regelungsproblemen bei chemischen Anlagen befaßte. Bereits hier fiel den Betreuern der Arbeit seine seltene Befähigung auf, technische Fragestellungen mit exakten mathematischen Mitteln zu bearbeiten. Dies war auch der Anlaß für seine Einstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische Chemie der TH Darmstadt, unmittelbar nach dem Studienabschluß in 1960.

Bereits 1963 promovierte er mit sehr gutem Erfolg an der Fakultät für Elektrotechnik der TH Darmstadt mit dem Thema „Das dynamische Verhalten und die Regelung chemischer Rohrreaktoren“. Von 1964 bis 1967 war er am Darmstädter Institut für Technische Chemie Leiter der Arbeitsgruppe Regelungstechnik. Ab Sommersemester 1964 erhielt er einen selbständigen Lehrauftrag an der Fakultät Chemie über „Dynamik und Regelung von Systemen mit örtlich verteilten Parametern“. Ebenfalls im Jahre 1966 erfolgte seine Ernennung zum Dozenten für das Fachgebiet Regelungstechnik an der TH Darmstadt.

Seine überaus erfolgreiche Tätigkeit wird auch durch den ihm bereits im Jahre 1967 zuerkannten renommierten DECHEMA-Preis unterstrichen. Seine Arbeiten auf dem genannten interdisziplinären Gebiet sind richtungsweisend.

Konsequenterweise erhielt er 1968, wie bereits erwähnt, einen Ruf an die Universität Stuttgart, den er annahm. Einen weiteren Ruf 1974 auf den Lehrstuhl für Elektrische Steuerung und Regelung der Ruhr-Universität Bochum lehnte er ab. 1975 hielt sich Herr Gilles zu einem halbjährigen Forschungsaufenthalt am Department of Chemical Engineering der State University of New York in Buffalo auf. Er unterhält zu dieser Institution und darüber hinaus auch zu weiteren internationalen Forschungseinrichtungen einen engen Kontakt.

Nach seiner Berufung im Jahre 1968 widmete sich Herr Gilles im überwiegenden Maße der Modellbildung und Simulation chemischer und biotechnologischer Prozesse. Die Beschäftigung mit diesen verfahrenstechnischen Prozessen führte bereits im Jahre 1973 zu einer Monographie mit dem Thema „Systeme mit verteilten Parametern“ in der Reihe Methoden der Regelungstechnik, erschienen im Oldenbourg-Verlag. Es handelt sich um eines der wenigen Bücher im deutschsprachigen Raum, das sich mit der Regelung, der Stabilität nach Ljapunov, der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit von durch partielle Differentialgleichungen beschriebenen Regelstrecken aus ingenieurmäßiger Sicht befaßt. Diesem Buch ist es zu verdanken, daß schon recht frühzeitig bei vielen

jüngeren Leuten das Interesse an dieser komplizierten Aufgabenstellung geweckt wurde.

Seinem Naturell entsprechend sorgte er im Laufe der Zeit dafür, daß zur Überprüfung der theoretisch gewonnenen Ergebnisse an seinem Institut ein Festbettreaktor, eine Destillationsanlage im Technikumsmaßstab sowie ein mikrobiologisches Labor mit drei Fermentern einschließlich der entsprechenden Meßapparate und Rechner aufgebaut wurden. Die Technikums- und Laboranlagen werden dabei über industrielle Prozeßleitsysteme bedient. Zur numerischen Berechnung und Simulation steht ein eigenes VAX-Cluster zur Verfügung. Eine derart moderne Ausstattung an einem Institut für Meß- und Regelungstechnik zur Bearbeitung der nachfolgend genannten interdisziplinären Aufgaben ist mir von keiner anderen Universität bekannt:

- Dynamik und Regelung von Prozessen der chemischen und biologischen Verfahrenstechnik.
  - dynamische Prozeß- und Anlagesimulation.
  - Einsatz von Prozeßleitsystemen zur Realisierung neuer Prozeßführungskonzepte.
- Darüber hinaus hat seine fachliche Betätigung zu einer, ebenfalls in der Reihe Methoden der Regelungstechnik im Oldenbourg-Verlag 1974 erschienenen, Monographie mit dem Thema „Struktur und Dynamik soziologischer Systeme“ geführt. Auch auf diesem Gebiet hat Herr Gilles, wie die Liste seiner Veröffentlichungen zeigt, einige vielbeachtete Arbeiten publiziert.

Ein weiteres Forschungsthema, das Herr Gilles nicht nur initiierte, sondern mit dem er sich auch intensiv befaßte, ist die Entwicklung eines Autopiloten für Binnenschiffe auf der Basis einer rechnergestützten Radarbild-Auswertung mit zusätzlicher Integration weiterer Sensoren wie Kurskreisel, Ultraschall-Doppler-Log und Global Positioning System. Bis heute wurde ein integriertes Navigationssystem entwickelt, das für die Schiffsführung eine Wissensbasis in Form einer elektronischen Flußkarte mit allen für die Schiffsführung notwendigen Informationen auswertet.

Dazu waren umfangreiche Tests mit einem eigenen Versuchsfahrzeug und mit zwei Großschiffen erforderlich. Die aktuellen Arbeiten konzentrieren sich auf die Erstellung der Wissensbasis und die Berücksichtigung der Verkehrssituation bei der Leitlinienplanung.

Daraus geht hervor, daß Herr Gilles in unterschiedlichen technischen Bereichen erfolgreich forscht und lehrt.

In Zusammenarbeit mit vier Instituten der Fakultät Verfahrenstechnik entstand zudem in Stuttgart ein universell einsetzbares Programmsystem DIVA zur dynamischen Simulation verfahrenstechnischer Anlagen. Wie mir bekannt ist, wurde diese einmalige Einrichtung nicht nur in hohem Maße von Herrn Gilles initiiert, sondern auch deren Realisierung trägt seine Handschrift. Dieses Simulationssystem besitzt eine offene Struktur mit den folgenden Programmelementen:

- Beschreibungsumgebung mit wissensbasierter Prozeß- und Anlagemodellerstellung und interaktiver, grafischer Fließbildeingabe,
- Laufzeitumgebung zur Ausführung der Simulation, der Grafik des Postprocessing, der Datenarchivierung und der Prozeßkopplung über Prozeßleitsysteme sowie
- Kommunikationssoftware zu externen Programmsystemen.

Die wichtigsten Aufgaben des Programmsystems DIVA umfassen folgende Bereiche:

- Dynamische Systemanalyse für die Prozeßplanung,
- Analyse und Erhöhung der Betriebssicherheit,
- Simulation neuer Konzepte für die Prozeßführung und -regelung.
- Planungshilfe für Einrichtungen der Prozeßleittechnik,
- Schulung und Weiterbildung des Betriebspersonals an Trainingssimulatoren für Prozeßleitsysteme.

Die erhöhten Anforderungen an Sicherheit, Produktivität, Qualität und Umweltfreundlichkeit chemischer Anlagen verlangen in immer stärkeren Maße nach der Anwendung leistungsfähiger Konzepte zur Prozeßführung und -überwachung. In Zusammenarbeit mit Herstellern und Anwendern von Prozeßleitsystemen wurde am Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik ein Zentrum für Prozeßleittechnik eingerichtet. Es geht dabei um die Realisierung moderner Meß-, Steuer- und Regelkonzepte mit Prozeßleitsystemen und deren Erprobung an vorhandenen Technikumsanlagen (Destillationsanlage, Festbettreaktor, Bioreaktoren). In diesem Zusammenhang besonders wichtig sind: die Entwicklung von intelligenten Sensor- und Aktorsystemen, die Schaffung geeigneter Schnittstellen zwischen Sensoren, Prozeßleitsystemen und Aktoren sowie die Einrichtung geeigneter Kommunikationsmöglichkeiten zwischen Mensch und Prozeß.

Über 120 Fachveröffentlichungen in anerkannten und renommierten Publikationsorganen belegen die überaus erfolgreiche wissenschaftlich-technische Tätigkeit in Forschung und Lehre von Herrn Gilles.

Wie sein Lebenslauf zeigt, ist Herr Gilles auch in hohem Maße ehrenamtlich tätig. Zur Zeit ist er Mitglied des Senates der Deutschen Forschungsgemeinschaft sowie einer größeren Anzahl von Berufsverbänden. Auch hat er vielfältige Aufgaben als Fachgutachter übernommen.

In den letzten Jahren ist es, basierend auf der geometrischen Theorie für nichtlineare Differentialgleichungen gelungen, erfolgversprechende verallgemeinerungsfähige Ansätze zur Optimierung und Regelung einer erweiterten Klasse von nichtlinearen Prozessen herzuleiten. Dieser modernen Entwicklung Rechnung tragend, hat Herr Gilles in Stuttgart eine Arbeitsgruppe unter seiner Leitung eingerichtet, die sich mit der nichtlinearen Optimierung und Regelung von chemischen und verfahrenstechnischen Prozessen befaßt. Erst vor wenigen Tagen hat er einem größeren Fachkreis ein interessantes Konzept vorgestellt, und damit wiederum recht eindrucksvoll seine Befähigung unter Beweis gestellt, moderne Entwicklungen frühzeitig in seine Forschungs- und Lehrtätigkeit aufzunehmen.

Agrund seiner überragenden theoretischen sowie experimentellen Beiträge, insbesondere zur Regelung chemischer und biotechnologischer Prozesse, halte ich Herrn Gilles für einen ausgezeichneten und kompetenten Fachmann, der die Verleihung der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille 1992 verdient. Mit ihm ehrt die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft einen Mann, der sowohl ein hohes fachliches als auch menschliches Ansehen genießt.

## **Dankrede und wissenschaftlicher Vortrag des Gauß-Preisträgers 1992 Ernst-Dieter Gilles**

Sehr geehrter Herr Präsident, meine sehr geehrten Damen und Herren,

zunächst möchte ich mich bei der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft und ihrem Präsidenten, Herrn Prof. Oberbeck, recht herzlich für die ehrenvolle Auszeichnung bedanken, die man mir mit der Verleihung der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille zuteil werden ließ. Herrn Prof. Thoma danke ich ganz besonders für seine persönlichen und freundschaftlichen Worte, die er in seiner Laudatio für mich gefunden hat. Ich habe Zweifel, ob ich dieser Auszeichnung und diesem Lob auch tatsächlich gerecht werden kann. Dies gilt ganz besonders in anbetracht des Namens von Carl-Friedrich Gauß, der mit dieser Ehrung verbunden ist.

Selbstverständlich freue ich mich außerordentlich, wenn unsere Forschungsarbeiten Beachtung und Anerkennung finden. Sollte diese Anerkennung gerechtfertigt sein, so ist dies keineswegs allein mein Verdienst, sondern auch das Verdienst meiner Kollegen und Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik der Universität Stuttgart. Ich freue mich sehr darüber, daß einige von Ihnen heute hier anwesend sind.

Herr Präsident, Sie haben mich gebeten, in meinem Festvortrag über Forschungsarbeiten meines Instituts zu berichten. Ich hoffe, daß ich mich dabei – trotz der in diesem Saale fehlenden Projektionsmöglichkeiten – einigermaßen verständlich machen kann. Das Thema meines Vortrags lautet: „Modellgestützte Regelung, ein Beitrag zur Autonomie von Prozessen und Systemen“.

E. D. GILLES, Stuttgart

## **Modellgestützte Regelung, ein Beitrag zur Autonomie von Prozessen und Systemen\***

Die klassische Aufgabe der Regelungstechnik besteht darin, Prozesse und Systeme trotz unterschiedlicher Störeinflüsse ihrem bestimmungsgemäßen Zweck entsprechend zu betreiben und dies möglichst ohne Einwirkung des Menschen.

So soll ein Flugzeug oder ein Schiff trotz unvorhersehbarer Strömungseinflüsse seinen vorgegebenen Kurs beibehalten;

eine chemische Anlage soll trotz Änderungen der Temperatur und des Drucks und trotz Schwankungen in der Rohstoffzusammensetzung einen Produktstrom gleichbleibender Qualität erzeugen;

weiter soll eine Antriebsanlage unabhängig von Lastschwankungen ihre Drehzahl aufrechterhalten.

Geregelte Prozesse und Systeme verfügen damit über einen bestimmten Grad an Autonomie: Ohne den Menschen vermögen sie auf Veränderungen ihrer Umwelt so zu reagieren, daß nur geringe Abweichungen vom erwünschten Verhalten auftreten. Erwünschtes Verhalten bedeutet nicht nur, daß bestimmte Größen wie Druck und Temperatur konstant gehalten werden. Das erwünschte Verhalten kann sich vielmehr an wesentlich komplizierteren Kriterien orientieren:

So soll z.B. eine chemische Anlage einen Produktstrom bestimmter Qualität erzeugen, ohne dabei aber den Menschen und die Umwelt zu gefährden oder zu belasten.

Gleichgültig, wo auch immer Regelungen zur Anwendung kommen, ob bei technischen Prozessen oder im nichttechnischen Bereich, wie z.B. bei biologischen Systemen, so beruht ihre Wirkungsweise stets auf demselben Grundprinzip:

Das dynamische Verhalten bestimmter Größen wird gemessen, um es dann mit dem erwünschten Verhalten dieser Größen zu vergleichen. Bestehen Abweichungen zwischen dem gemessenen und erwünschten Verhalten, so werden selbsttätig Maßnahmen ergriffen, die diesen Abweichungen entgegenwirken. Diese Maßnahmen sind Stell-eingriffe über Ventile, Ruder, Antriebsorgane und dergleichen.

Betrachten wir die Entwicklung der Regelungstechnik seit ihren Anfängen, so ist die Zielsetzung dieser Entwicklung darauf ausgerichtet, den Grad an Autonomie von Prozessen und Systemen, der durch Regelung erreicht werden kann, immer weiter zu erhöhen. Heute verfügen wir z.B. über autonom mobile Fahrzeuge, die sich in einer komplexen Navigationslandschaft zurechtfinden können, oder über Roboter, die komplizierte Aufgaben verrichten und dabei eine Vielzahl von Entscheidungen zu treffen haben.

---

\* Vortrag anläßlich der Verleihung der Gauß-Medaille der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft, Juni 1992



Einen hohen Grad an Autonomie kann man allerdings nur dann erreichen, wenn der aktuelle Zustand, in dem sich ein Prozeß oder System befindet, möglichst vollständig und genau zu bestimmen ist.

Im allgemeinen ist davon auszugehen, daß die an einem Prozeß installierten Sensoren die dazu erforderlichen Informationen nicht in vollem Umfang zur Verfügung stellen können. Es lassen sich zwar in einem chemischen Reaktor die Temperatur und der Druck leicht messen. Die primär interessierenden Konzentrationen und Qualitätsmerkmale von Produkten entziehen sich aber meist einer direkten meßtechnischen Erfassung. Um diese Schwierigkeiten bei der Bestimmung des aktuellen Prozeßzustands zu überwinden, ist es erforderlich, bei der Verarbeitung der Sensorinformationen auch zusätzliches a-priori-Wissen über das Prozeßverhalten zu berücksichtigen. Dieses a-priori-Wissen liegt im allgemeinen in Form eines mathematischen Modells vor, das in der Lage ist, das Prozeßverhalten zu beschreiben.

Die Frage stellt sich dabei, wie Sensorinformationen in geeigneter Weise mit a-priori-Wissen über das Prozeßverhalten verknüpft werden können. Völlig unabhängig von dem betrachteten Anwendungsgebiet lautet die Antwort auf diese Frage: durch *modellgestützte Informationsverarbeitung*.

Im folgenden sei dies an zwei sehr unterschiedlichen Beispielen erläutert. Dabei handelt es sich einmal um ein Problem der chemischen Verfahrenstechnik, nämlich um die Früherkennung gefährlicher Reaktionszustände in einem chemischen Reaktor. Bei dem zweiten Beispiel geht es um ein Verkehrsproblem und damit um ein völlig anderes Anwendungsgebiet. Es wird der Aufbau eines integrierten Navigationssystems für den Küsten- und Binnenbereich diskutiert. Es soll gezeigt werden, daß die Methoden, die in beiden Fällen zum Einsatz kommen, um einen gewissen Grad an Prozeß- und Systemautonomie zu erreichen, in ihren prinzipiellen Ansätzen gleich und durch eine modellgestützte Informationsverarbeitung gekennzeichnet sind.

### **Früherkennung gefährlicher Reaktionszustände**

Betrachtet wird ein Reaktor, in dem eine Sulfonierungs- oder eine Nitrierungsreaktion in halbkontinuierlicher Betriebsweise durchgeführt wird. Halbkontinuierlich bedeutet, daß bestimmte Komponenten vorgelegt und andere kontinuierlich dem Reaktionsgemisch zudosiert werden. Das zu lösende Überwachungsproblem besteht darin, möglichst frühzeitig das Anspringen einer unerwünschten und stark exothermen Zersetzungsreaktion zu erkennen, die schließlich zu einem explosionsartigen Durchgehen des Reaktors führen kann. Dieses Anspringen der Zersetzungsreaktion wird nicht nur durch Temperatur und Druck bestimmt, die im Reaktor verhältnismäßig leicht gemessen werden können. Entscheidend sind vor allem auch die Konzentrationen bestimmter Zwischenprodukte und katalytisch wirkender Substanzen, die sich einer meßtechnischen Erfassung im Reaktor im allgemeinen entziehen. Um das Überwachungsproblem dennoch lösen zu können, muß man diese Konzentrationen in ihrem zeitlichen Verhalten aus leicht meßbaren Zustandsvariablen wie Druck und Temperatur rekonstruieren. Um dies zu ermöglichen, ist a-priori-Wissen über das Reaktions-

geschehen in Form eines detaillierten mathematischen Reaktormodells erforderlich. Dieses Modell simuliert man in Echtzeit, z.B. mit Hilfe eines Rechners und schaltet es dem realen Prozeß parallel. Dies bedeutet, daß die Informationen über die zeitlichen Verläufe der Steuergrößen, die wie Kühltemperatur, Zulaufkonzentrationen und Zulauftemperatur auf den Reaktor einwirken, soweit bekannt auch dem Reaktormodell zugeführt werden. Damit existieren zwei Welten und zwar eine reale Welt und eine auf dem Rechner realisierte Modellwelt. Zur realen Welt gehören der Reaktor und alle an dem Reaktor installierten Meßeinrichtungen. Die Modellwelt ist eine mit Hilfe des verfügbaren a-priori-Wissens auf dem Rechner in Echtzeit realisierte Nachbildung der realen Welt. Diese Nachbildung umfaßt auch Modelle aller zur Verfügung stehenden Meßeinrichtungen. Entscheidend ist nun, daß sich die Modellwelt mit der realen Welt stets in guter Übereinstimmung befindet. Dies muß trotz der unvermeidbaren Modellfehler gewährleistet sein, die die Modellwelt immer enthält. Auch unbekannte Störeinflüsse, die auf die reale Welt wirken, dürfen nicht zu einer Divergenz der beiden Welten führen. Um eine Konvergenz der Modellwelt gegen das Verhalten der realen Welt sicherzustellen, werden die verfügbaren Sensorsignale herangezogen. Die entsprechenden Größen in der Modellwelt werden mit Hilfe der dort verfügbaren Sensormodelle ebenfalls bestimmt, um sie dann mit den Sensorsignalen der realen Welt zu vergleichen. Unterschiede in den einander zugeordneten Signalen beider Welten werden dann zu Korrektursignalen verstärkt, mit denen dann korrigierend in die Modellwelt eingegriffen wird. Dieser Eingriff erfolgt im Sinne eines Abgleichs so, daß das Verhalten der Modellwelt möglichst rasch gegen das Verhalten der realen Welt konvergiert. Bei dem Kriterium, das diesem Abgleich zugrunde liegt, spielt die Minimierung der Gaußschen Fehlerquadrate eine entscheidende Rolle, um damit eine Verbindung zu dem heutigen Tag herzustellen.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, daß man – im Vergleich zu den Sensorsignalen der realen Welt – aus der mit Hilfe eines Rechners simulierten Modellwelt wesentlich detailliertere Informationen über den Prozeß und seine Verhaltensweise gewinnen kann. Mit anderen Worten bedeutet dies, daß wir der Modellwelt nicht nur die leicht meßbaren Zustandsvariablen wie Temperatur und Druck, sondern darüberhinaus im Idealfall auch alle Konzentrationen nichtmeßbarer Zwischenprodukte und katalytisch wirkender Verunreinigungen in ihrer simulierten Form entnehmen können. Voraussetzung ist allerdings ein hinreichend genaues Modell der Reaktionskinetik und des Reaktors. Darüberhinaus muß der Prozeß eine wichtige Struktureigenschaft erfüllen. Er muß nämlich in seinen inneren Vorgängen über die zur Verfügung stehenden Meßgrößen beobachtbar sein. Trotz dieser Einschränkungen stellt die modellgestützte Informationsverarbeitung bei der Führung und Überwachung verfahrenstechnischer Prozesse ein äußerst leistungsfähiges Werkzeug dar.

Der Entwurf von Verfahren zur modellgestützten Informationsverarbeitung ist nicht immer einfach. Er kann im allgemeinen aber so erfolgen, daß der Abgleich zwischen beiden Welten trotz auftretender Störeinflüsse und trotz der stets vorhandenen Modell- und Meßfehler mit hinreichender Genauigkeit erfolgt. Die simulierten Zustandsvariablen können damit anstelle des nicht vollständig meßbaren Prozeß-

zustands zum Zwecke der Prozeßführung weiterverarbeitet werden. Im Hinblick auf das hier diskutierte Überwachungsproblem stehen damit alle Informationen zur Verfügung, um sehr frühzeitig die Gefahr des Anspringens gefährlicher Zersetzungsreaktionen zu erkennen. Geeignete Gegenmaßnahmen können dann in ein rechnergestütztes Prozeßführungskonzept integriert werden, um einen sicheren Reaktionsablauf zu gewährleisten. Wir haben solche Verfahren sowohl an Laborapparaten als auch an großtechnischen Produktionsanlagen erfolgreich erprobt und damit einen Beitrag zur Sicherheit von chemischen Anlagen leisten können.

Ein weiterer sehr wichtiger Anwendungsbereich dieser modellgestützten Informationsverarbeitung betrifft die Qualitätssicherung in der Verfahrenstechnik. Hier sind Prozeßführungskonzepte für chemische Produktionsanlagen zu entwickeln, die unabhängig von Störeinflüssen verschiedenster Art eine reproduzierbare Herstellung bestimmter Produktqualitäten erlauben.

Einem breiten Einsatz von Verfahren der modellgestützten Informationsverarbeitung in der chemischen Industrie stehen heute noch zwei Schwierigkeiten entgegen, und zwar das Modellierungsproblem und das Simulationsproblem.

In der Verfahrenstechnik gibt es eine fast unüberschaubare Vielzahl unterschiedlicher Apparatetypen. Eine Modellbibliothek, die Modelle für alle Apparatetypen enthält, wäre außerordentlich umfangreich und deshalb kaum zu pflegen und zu warten. Hinzu kommt, daß bei der Modellierung einer konkreten Anlage in der Regel doch noch Änderungen einiger Apparatemodelle vorgenommen werden müßten, um diese den realen Gegebenheiten anzupassen. Bei einer genaueren Analyse der unterschiedlichen Apparatemodelle stellt man allerdings fest, daß sich diese trotz all ihrer Unterschiede aus gleichartigen Modellbausteinen aufbauen lassen. Der Schlüssel zur Lösung des Modellierungsproblems besteht daher in der Definition eines vollständigen, aber zahlenmäßig begrenzten, Satzes elementarer Modellbausteine mit disjunkter Funktionalität, aus denen sich Apparatemodelle durch Verschalten und Aggregieren aufbauen lassen. Die Definition eines solchen Satzes von elementaren Modellbausteinen einschließlich der Regeln zu ihrer Verknüpfung entspricht einer an Gesichtspunkten des Modellierens orientierten Strukturierung des verfahrenstechnischen Wissens. Die Modellierung kann dann auf der Grundlage dieses Wissens rechnergestützt, und damit sehr effizient und flexibel, erfolgen, so daß sich auf diese Weise der Modellierungsengpaß beseitigen läßt.

Die Apparate- und Anlagenmodelle bestehen in der Regel aus Differential-Algebra-Gleichungssystemen von sehr hoher Ordnung. Für die numerische Behandlung solcher großen Gleichungssysteme stehen zwar heute bereits leistungsfähige Integratoren und Gleichungslöser zur Verfügung. Es gibt allerdings noch eine Reihe offener Fragen der numerischen Mathematik, die gelöst werden müssen, um den Simulationsengpaß zu beseitigen. Leistungsfähigere Simulationsstrategien sind insbesondere dann dringend erforderlich, wenn die Simulation wie im Falle einer modellgestützten Informationsverarbeitung in Echtzeit erfolgen muß.

### **Autonom mobiles Schiff für den Küsten- und Binnenbereich**

Am Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik wird im Rahmen des von der DFG geförderten Sonderforschungsbereichs „Hochgenaue Navigation“ ein integriertes Navigationssystem für die Binnen- und Küstenschifffahrt entwickelt und experimentell erprobt. Ziel dieses Projekts ist ein System, mit dessen Hilfe ein Schiff unter normalen Verkehrsbedingungen automatisch auf einer Wasserstraße geführt werden kann. Die Forderung nach voller Autonomie bedeutet, daß dieses Navigationssystem ohne zusätzliche Einrichtungen außerhalb des eigenen Schiffes auskommen muß. Ein solches System kann den Schiffsführer von ermüdenden Routinearbeiten entlasten und ihn insbesondere in schwierigen Situationen wie z.B. bei Nebel- und Nachtfahrten unterstützen. Dadurch läßt sich die Sicherheit des Verkehrs auf Wasserstraßen wesentlich erhöhen und das Risiko für die Umwelt beim Transport gefährlicher Güter erheblich vermindern.

Allgemein besteht die Aufgabe eines integrierten Navigationssystems darin, detaillierte Navigationsdaten bereitzustellen, um auf dieser Grundlage die Bewegung eines autonom mobilen Fahrzeugs in einer Navigationslandschaft planen und ausführen zu können. Zur Erfüllung dieser Aufgabe stehen einem Navigationssystem unterschiedliche Informationsquellen zur Verfügung. Dazu gehören:

- Bildgebende Sensoren (Radar, Videokamera, Laserscanner) zur Erfassung der Navigationsumgebung des Fahrzeugs)
- Sensoren (Inertial-, Ultraschall-, Laser-...) und Ortungsverfahren (Funk, Satelliten, ...) zur Bestimmung von Position, Kurs und Geschwindigkeit des navigierenden Fahrzeugs
- A-priori-Wissen in Form eines mathematischen Modells zur Beschreibung der Fahrzeugdynamik
- A-priori-Wissen in Form einer Bank mathematischer Modelle zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens fremder Fahrzeuge
- A-priori-Wissen in Form einer Wissensbasis zur Darstellung der Navigationslandschaft (elektronische Geländekarte, Stadtplan, Plan einer Fabrikhalle ...)
- Wissensbasis zur Darstellung von Verkehrsregeln.

Die Bezeichnung „integriert“ bedeutet, daß das Navigationssystem Meßinformationen verschiedenartiger Sensoren und unterschiedlicher Arten von abgespeichertem a-priori-Wissen koordiniert verarbeitet, um die gestellte Aufgabe der Fahrzeugführung zu lösen. Die Verarbeitung dieser sehr unterschiedlichen Informationen muß in Echtzeit erfolgen und schließlich zur Generierung einer Leitlinie führen, der das Fahrzeug durch geeignete Betätigung seiner Steuer- und Antriebsorgane selbsttätig folgt.

Im konkreten Fall des von uns für den Binnen- und Küstenbereich konzipierten autonom mobilen Schiffes stehen folgende Informationsquellen zur Verfügung:

- Bordradar und Laserscanner als bildgebende Sensoren
- Kurs- und Wendekreisel

- GPS-Empfänger zur Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung
- Ultraschall-Doppler-Log zur Geschwindigkeitsbestimmung gegenüber Grund oder Wasser
- Mathematisches Modell für die Längs- und Querdynamik des navigierenden Schiffes
- Bank mathematischer Modelle zur Beschreibung der Dynamik fremder Schiffe
- Elektronisch gespeicherte Karte der Wasserstraße als Modell der Fluß- und Küstenlandschaft mit allen für die Navigation wichtigen Besonderheiten und Angaben
- Wissensbasis für die Darstellung der Verkehrsregeln.

Bei der integrierten Informationsverarbeitung im Navigationssystem werden den verschiedenen Informationsquellen unterschiedliche Gewichte zugeordnet, die ihrer Bedeutung für das Navigieren sowie ihrer Genauigkeit und Zuverlässigkeit entsprechen. Diese Gewichte sind nicht konstant, sondern ändern sich zeitlich mit den jeweiligen Gegebenheiten. Die offene und modulare Struktur des von uns entwickelten, redundant ausgelegten Navigationssystems erlaubt es, neue Informationsquellen hinzuzufügen oder im Falle einer Störung bei gegebenenfalls eingeschränktem Funktionsumfang auch auf die eine oder andere Quelle zu verzichten.

Das Navigationssystem erfüllt folgende Funktionen:

- Bestimmung der Position, des Kurswinkels und der Geschwindigkeit des navigierenden Schiffes in einer in Gauß-Krüger-Koordination elektronisch abgespeicherten Flußkarte
- Verfolgung der Positionen und Geschwindigkeiten aller Objekte im Bereich des Fahrwassers (andere Schiffe, Radartonnen, ...) zur Erfassung der aktuellen Verkehrssituation
- Planung der Leitlinie in der lokalen Navigationsumgebung mit der Möglichkeit eines interaktiven Eingriffs durch den Schiffsführer
- Führung des Schiffes entlang der Leitlinie durch Eingriff in Ruderanlage und Antriebsmaschine
- Kommunikation mit dem Schiffsführer zur Überwachung und Bedienung des Navigationssystems.

Um ein Fahrzeug in einer Navigationsumgebung unter Berücksichtigung vorgegebener Verkehrsregeln führen zu können, müssen sowohl über die Position und den Bewegungszustand des Fahrzeugs als auch über dessen Navigationsumgebung genügend genaue und detaillierte Informationen vorliegen. Im allgemeinen ist davon auszugehen, daß die auf dem Fahrzeug installierten Sensoren die benötigten Informationen nicht in vollem Umfang zur Verfügung stellen können. Deshalb ist es erforderlich, bei der Verarbeitung der Sensorinformationen – wie im vorher betrachteten Beispiel chemisch verfahrenstechnischer Prozesse – auch zusätzliches a-priori-Wissen einzubringen. Dieses Wissen betrifft jetzt das Fahrzeugverhalten und die Eigenschaften der aktuellen Navigationsumgebung, in der sich das Fahrzeug bewegt. Eine geeignete Verknüpfung

von Sensorinformationen und a-priori-Wissen kann auch hier über eine modellgestützte Informationsverarbeitung erfolgen. Die reale Welt umfaßt in diesem Beispiel das navigierende Schiff einschließlich aller darauf installierten Sensoren sowie die lokale Navigationsumgebung dieses Schiffes mit den anderen Verkehrsteilnehmern. Die Modellwelt ist eine auf dem Rechner simulierte Abbildung dieser Realität mit Echtzeitverhalten.

Die Quer- und Längsdynamik des navigierenden Schiffes wird durch ein mathematisches Modell beschrieben. Eine wesentliche Voraussetzung für die Nachbildung der lokalen Navigationsumgebung ist die Verfügbarkeit einer elektronischen Karte der Wasserstraße. In dieser Wasserstraßen-Datenbank sind alle für die Nachbildung der Wasserstraße und für die Schiffsführung notwendigen Informationen abgelegt. Der Aufbau dieser Karte orientiert sich an den Anforderungen, die sie im integrierten Navigationssystem zu erfüllen hat. Diese sind vor allem durch die geforderte Echtzeitfähigkeit der implementierten Algorithmen gegeben. So steht für das Lesen und Auswerten der für den Vergleich mit einem Radarbild erforderlichen Karteninformationen weniger als eine Sekunde Echtzeit zur Verfügung. Die Karte ist als eine objektorientierte Datenbank realisiert, die den für den Bildvergleich erforderlichen sehr schnellen Zugriff erlaubt. Ihre Darstellung erfolgt in Gauß-Krüger-Koordinaten. Die Datenbank unterscheidet zwischen realen und virtuellen Objekten. Zu den realen Objekten gehören alle sichtbaren Objekte wie Uferlinien, Brücken, Buchten, Buhnen etc. Virtuelle Objekte beinhalten Informationen, die für die Schiffsführung relevant sind, wie z.B. Flußachse, Fahrwassergrenzen und Idealkurs für die Berg- und Talfahrt.

Die Navigationsumgebung umfaßt auch die dort navigierenden fremden Schiffe und verankerten Radartonnen. Um diese hinsichtlich ihrer Position und ihres Bewegungsverhaltens nachbilden zu können, steht in der Modellwelt eine Bank dynamischer Schiffsmodelle zur Verfügung. Jedes dieser Modelle beschreibt die Quer- und Längsdynamik eines fremden Objekts, wobei im Falle eines fremden Schiffes sowohl die Ruderstellung als auch die Motordrehzahl als unbekannte Stellgrößen zu betrachten sind.

Mit dem mathematischen Modell des navigierenden Schiffes, der elektronischen Fluß- oder Küstenkarte und den Modellen für fremde Objekte läßt sich im Rechner ein Abbild der realen Welt schaffen. Entscheidend ist nun, daß der Abgleich dieser Modellwelt mit der realen Welt gelingt. Wie bereits beschrieben, ist ein Vergleich der Sensordaten mit den entsprechenden Signalen der Modellwelt die Basis dieses Abgleichs. Das Ziel ist dabei eine möglichst genaue Schätzung der Position des navigierenden Schiffes und eine möglichst wirklichkeitsgetreue Nachbildung der das Schiff umgebenden Navigationslandschaft. Letztere schließt auch eine zuverlässige Rekonstruktion der Trajektorien aller in der Umgebung befindlichen fremden Schiffe mit ein.

Bei den weiteren Betrachtungen wollen wir uns auf den Abgleich zwischen Modellwelt und realer Welt anhand des Vergleichs zwischen Radarbild und abgespeicherter Flußkarte konzentrieren. Dabei gehen wir von der Annahme aus, daß aufgrund der Auswertung früherer Radarbilder und durch eine Prädiktion mit Hilfe des als a-priori-Wissen zur Verfügung stehenden Schiffsmodells eine erste möglicherweise noch grobe

Positionsschätzung des navigierenden Schiffes vorliegt. Gibt man der elektronischen Karte diese Koordinatenwerte vor, so liefert diese alle in der Nähe befindlichen Kartenobjekte mit ihren Abständen zu dieser Position. Mit diesen Informationen läßt sich eine dem Radarbild vergleichbare Kontur der aktuellen Navigationsumgebung erstellen. Im Sinne eines Abgleichs wird die prädizierte Schiffsposition solange vom Rechner variiert, bis das Radarbild und die Flußkarte bestmöglichst zur Deckung gebracht sind. Auf diese Weise gelangt man zu einer verbesserten Schätzung der Schiffsposition. Der Bildvergleich liefert also Korrekturwerte für die aufgrund früherer Messungen prädizierte Schiffsposition und zwar in dem absoluten Koordinatensystem der Flußkarte.

Die Unsicherheit, mit der die Bestimmung der Koordinatenwerte aus einem Bildvergleich behaftet ist, hängt von den strukturellen Gegebenheiten des betrachteten Bildes ab. So ist die Unsicherheit bei der Bestimmung der Korrekturkomponente in Flußlängsrichtung immer dann groß, wenn das aktuelle Bild keine markanten Strukturen besitzt, die eine genaue Schätzung der Flußlängsposition ermöglichen. Dies gilt z.B. im Falle eines geraden oder konstant gekrümmten Flußabschnitts ohne besondere Merkmale quer zur Flußrichtung wie Brücken, sichtbare Buhnen oder auch Buchten im Flußufer. Um auch unter diesen Gegebenheiten zu einer möglichst optimalen Schätzung der Schiffsposition zu gelangen, muß man die mit Hilfe des Schiffsmodells prädizierte Position und die aus dem Bildvergleich ermittelte Position mit Gewichten behaften, die der Genauigkeit des Modells und der aktuellen Genauigkeit des Bildvergleichs entsprechen. In Abhängigkeit von den jeweiligen Gegebenheiten ist also einmal stärker die Prädiktion mit Hilfe des Modells und einmal stärker der Bildvergleich für die Positionsschätzung des navigierenden Schiffes heranzuziehen. Ein modellgestütztes Meßverfahren, das diesen Anforderungen genügt, ist das Kalman-Filter-Verfahren. Darüberhinaus bietet die Kalman-Filter-Technik die Möglichkeit, auch Informationen anderer Sensoren unter Berücksichtigung ihrer Fehlereigenschaften in die modellgestützte Informationsverarbeitung einzubeziehen, um auf diese Weise ein integriertes Navigationssystem aufzubauen.

Obwohl der Bildvergleich im allgemeinen auch für die Bestimmung der Schiffsposition in Flußlängsrichtung genügend Informationen liefert, ist eine Stützung durch einen geschwindigkeits- oder weggebenden Sensor wie das Ultraschall-Doppel-Log oder GPS sehr vorteilhaft, um in jeder Situation ein absolut sicheres und genaues Mitführen der Karte zu gewährleisten.

Ein Radarbild liefert nicht nur ein Abbild der aktuellen Navigationslandschaft, sondern auch Echos fremder Objekte, die sich im Fahrwasser bewegen oder die in dessen Randbereich verankert sind. Beispiele sind vor allem fremde Schiffe und Radartonnen. Zur Nachbildung dieser Objekte steht in der Modellwelt eine Bank von dynamischen Modellen zur Verfügung. Jedem Objekt, das im Radarbild erscheint, wird eines dieser Modelle zugeordnet. Dabei werden mögliche Ruder- und Antriebskräfte dieser Objekte als unbekannte Größen betrachtet. Die mit den Modellen berechneten Positions- und Geschwindigkeitswerte müssen nun mit den entsprechenden Werten der realen Welt in Übereinstimmung gebracht werden. Dazu reicht allerdings ein einzelnes Radarbild nicht aus. Vielmehr muß man die chronologische Entwicklung der gesamten Verkehrs-

szenen auswerten. Diese Auswertung liefert dann auch eine Schätzung der jeweiligen Ruder- und Antriebskräfte.

Nach Eintreffen eines neuen Radarbildes wird dieses zunächst interpretiert. Dies bedeutet, daß die erkannten fremden Objekte entweder bereits bestehenden oder neu zu beginnenden Objektbahnen zugeordnet werden. Bei dieser Interpretation des Radarbildes besteht allerdings auch die Möglichkeit, bestimmte Erscheinungen im Radarbild nicht als Objekt, sondern als Störungen zu interpretieren. Es ist leicht vorstellbar, daß die Bildinterpretation mehrere Hypothesen zuläßt, denen nicht zuletzt auch aufgrund der Vorgeschichte bestimmte Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden können. Jede dieser Hypothesen ist dann bis zum Eintreffen des nächsten Radarbildes weiterzuverfolgen. Ein Problem ist das exponentielle Anwachsen der Anzahl dieser Hypothesen mit der Zeit. Um die Bahnkurven der einzelnen Objekte zu schätzen, kommen auch hier Kalman-Filter zum Einsatz. Die Bildinterpretation erfolgt mit Hilfe rekursiver Bayesscher Hypothesentest-Verfahren.

Gelingt es, in der beschriebenen Weise das Verhalten der Modellwelt mit dem der realen Welt in Übereinstimmung zu bringen, so lassen sich dieser Modellwelt alle Informationen entnehmen, die auf der Leitebene benötigt werden, um das Schiff automatisch zu führen. Zunächst erfolgt auf der Leitebene die Planung der Leitlinie, der das Schiff nachzuführen ist. Die Basis dieser Planung sind die in der Datenbank der elektronischen Flußkarte abgelegten Ideallinien für die Berg- und Talfahrt. Diese Ideallinien sind als Leitlinien zu verwenden, solange es die aktuell vorliegende Verkehrssituation erlaubt. Falls erforderlich, können die Ideallinien auch wasserstandsabhängig abgespeichert werden. Die Planung einer Leitlinie muß vor allem die aktuelle Verkehrssituation und damit die Ergebnisse der Objektverfolgung berücksichtigen. Sie muß unter Beachtung der jeweiligen Verkehrsregeln erfolgen. Wichtig ist eine übersichtliche Darstellung der Planungsergebnisse auf einem Farbbildschirm und die Möglichkeit für den Schiffsführer, interaktiv in den Planungsvorgang einzugreifen. Die Bahnregelung des Schiffes geschieht durch direkten Eingriff des Navigationssystems in die Ruder- und Antriebsanlage. Dabei ist die durch das Schiffsmodell beschriebene Schiffsdynamik und in gewissen Grenzen auch die Strömungsdynamik der Wasserstraße zu beachten.

Zur Erprobung des entwickelten Navigationssystems stehen zwei institutseigene Versuchsboote sowie kommerzielle Motorgüterschiffe zur Verfügung. Die hier beschriebene Funktionalität des Navigationssystems ist weitgehend erreicht und auch erfolgreich experimentell unter realistischen Voraussetzungen erprobt. Ein automatisches Fahren ist überall dort möglich, wo elektronische Karten der Wasserstraße zur Verfügung stehen. Zur Zeit gilt dies für den Rhein und einige seiner wichtigsten Nebenflüsse, einen Teil der Donau und den Main-Donau-Kanal. Einer der nächsten Schritte wird darin bestehen, die Voraussetzungen zu schaffen, um das entwickelte Navigationssystem auf Binnenwasserstraßen großtechnisch zum Einsatz bringen zu können.



### **Abschließende Bemerkungen**

Mit den beiden Beispielen wollte ich zeigen, wie eine modellgestützte oder auch wissensbasierte Informationsverarbeitung erfolgen kann, um Systeme und Prozesse mit einem hohen Grad an Autonomie auszustatten. Obwohl die beiden Beispiele sehr verschiedenen technischen Anwendungsgebieten zuzuordnen sind, ist die Methodik der Vorgehensweise grundsätzlich die gleiche. Daran ist zu erkennen, daß die Regelungstechnik mit ihrem methodischen Vorgehen eine Klammer zwischen unterschiedlichen Gebieten der Technik bildet und der durch fortschreitende Diversifizierung bedingten Verfremdung in der Technik entgegenwirkt. Auch in diesem Sinne wird der Regelungstechnik in Zukunft eine wachsende Bedeutung zukommen.

---

Prof. Dr. E. D. Gilles  
Bauernwaldstraße 131 · 7000 Stuttgart 1

# DIE BRAUNSCHWEIGISCHE WISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT

## VERLEIHT DIE CARL-FRIEDRICH-GAUSS-MEDAILLE

HERRN UNIVERSITÄTSPROFESSOR DR.-ING.

**ERNST-DIETER GILLES**

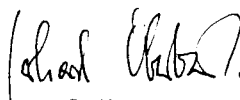
UNIVERSITÄT STUTTART

IN WÜRDIGUNG SEINER AUSSERORDENTLICHEN  
WISSENSCHAFTLICHEN VERDIENSTE AUF DEM GEBIET  
DER REGELUNGSTECHNIK

Professor Dr.-Ing. Gilles hat mit bedeutenden Arbeiten zur Dynamik und Regelung von Systemen mit örtlich verteilten Parametern, insbesondere durch die Modellierung und Simulation chemischer und biotechnologischer Prozesse sowie durch den Aufbau eines Zentrums für Prozeßleittechnik erheblich zum Fortschritt der modernen Regelung von Prozessen der chemischen und biotechnologischen Verfahrenstechnik beigetragen.

Braunschweig, den 30. April 1992



  
Präsident  
der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft

**Gilles, Ernst-Dieter, Dr.-Ing., Dipl.-Ing., Univ.-Prof. und Direktor des Instituts für Systemdynamik und Regelungstechnik an der Fakultät für Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart, Bauernwaldstraße 131, 7000 Stuttgart 1**

- 1935, 16. 05. geboren in St. Goarshausen
- 1954 Abitur am Gymnasium in St. Goarshausen
- 1960 Dipl.-Ing. (Technische Hochschule [TH] Darmstadt)
- 1963 Dr.-Ing. (TH Darmstadt, Fakultät für Elektrotechnik)
- 1966 Habilitation für Elektrotechnik an der TH Darmstadt
- 1960–1963 Wissenschaftlicher Mitarbeiter sowie
- 1964–1967 Leiter der Arbeitsgruppe Regelungstechnik am Institut für Chemische Technologie der TH Darmstadt
- 1964 Lehrauftrag an der Fakultät für Chemie der TH Darmstadt über Dynamik und Regelung chemischer Reaktoren
- 1966 Ernennung zum Dozenten für das Fachgebiet Regelungstechnik an der TH Darmstadt
- 1968 Ruf auf das Ordinariat für Meß- und Regelungstechnik und Ernennung zum Direktor des Instituts für Systemdynamik und Regelungstechnik der Universität Stuttgart
- 1974 Ablehnung eines Rufs auf den Lehrstuhl für Elektrische Steuerung und Regelung der Ruhruniversität Bochum
- Publikationen:** 124 wissenschaftliche Veröffentlichungen auf den Gebieten „Dynamik und Regelung verfahrenstechnischer Prozesse“, „Regelung von Systemen mit verteilten Parametern“ sowie „Automatisierte mobile Schiffsführung“
- Tätigkeiten für die Deutsche Forschungsgemeinschaft:** Fachgutachter 1972–1976 und 1983–1991  
Mitglied des Senatsausschusses für Sonderforschungsbereiche 1976–1981  
Koordinator des Schwerpunktprogramms Messen, Steuern und Regeln von dynamischen Systemen 1981–1991  
Mitglied des Senats seit 1991
- Sprecher:** der DFG-Forschungsgruppe „Methoden zur Modellierung und Berechnung der Dynamik verfahrenstechnischer Prozesse (seit 1981) des Zentralen Schwerpunktprojekts Bioverfahrenstechnik der Universität Stuttgart (1987–1991)“
- Herausgeber:** Zeitschrift „Automatisierungstechnik at“, Oldenbourg-Verlag (Mitglied des wissenschaftlichen Beirats seit 1983)  
„Journal of Process Control“, Butterworths Scientific Ltd. (European Regional Editor seit 1990)
- Gutachter-tätigkeiten:** für die Volkswagenstiftung, die Humboldt-Stiftung, den Deutschen Akademischen Austauschdienst (seit 1968)
- Mitgliedschaften:** DECHEMA, VDI, IEEE, AIChE, SCS, ASC, IMACS
- Ehrungen:** 1967 DECHEMA-Preis für Arbeiten über die Dynamik und Regelung chemischer Systeme  
1992 Carl-Friedrich-Gauß-Medaille der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft



## Schlußworte

Schlußworte, meine sehr geehrten Damen und Herren, das klingt verheißungsvoll. Man hofft, daß der mit dem Schlußwort Beauftragte mit der Zeit zurecht kommt und ein Ende findet.

Zeit: was ist das schon? Vergangenheit glauben wir zu kennen, Gegenwart beschäftigt uns, für die ungewisse Zukunft glauben wir zu arbeiten. Wir meinen, daß die Zeit sich bewege. Das ist ein Irrtum: die Zeit steht still, wir bewegen uns in der Zeit.

Wir messen Zeit und messen mit der Zeit, es gibt neue Begriffe – Nanosekunden, unbegreifliche Entfernungen im All drücken wir mit Milliarden Lichtjahren aus. Die Jahresversammlung endet in wenigen Minuten, unser Jahrtausend mit diesem aufregenden 20. Jahrhundert endet in 8 Jahren.

1995 wird die Carolo Wilhelmina 250 Jahre alt, 1745 von Herzog Carl I., dem Schwager Friedrich des Großen, der gerade den 2. Schlesischen Krieg begonnen hatte, begründet. Das war 25 Jahre vor der Erfindung der Dampfmaschine durch James Watt, dem Beginn der industriellen Revolution.

1993/94 wird die BWG 50 Jahre alt, sie wurde also im 2. Weltkrieg gegründet, als das böse Ende schon unabwendbar war.

50 Jahre! Welch ein Wandel seitdem in Wissenschaft und Technik:

Kerntechnik, Raumfahrt, Überschallgeschwindigkeit, Telekommunikation, Satelliten, Mondlandung, Mikrobiologie, Gentechnik, Laser, Halbleiter, Informatik, Chips, Modellgestützte Regelung, Autonomie von Prozessen und Systemen, Mikroelektronik.

An all dies mußte ich denken, als ich Ihrem Vortrag, verehrter Herr *Gilles*, und Ihrer Laudatio, verehrter Herr *Thoma*, zu folgen versuchte.

Wie war das am Anfang meines Studiums?

1938: Matheabitur mit Logarithmentafel

1940: Vorexamen mit Rechenschieber, dem damaligen Statussymbol des Ingenieurs, dann mechanische Rechenmaschine zum Einstellen und Handkurbel: *Brunsviga*.

1950: die elektrische Rechenmaschine mit Kontrollstreifen: *Olympia*.

heute: Taschenrechner mit Solarenergie und Rechenzentren.

Einer der ersten Präsidenten unserer BWG, Prof. Dr.-Ing. Paul *Koessler*, hat anläßlich seiner Dankesrede an seinem 90. Geburtstag in weiser Melancholie gesagt: „Meine Diplomarbeit, meine Dissertation, meine Habilitation, fast meine gesamten Publikationen – heute: alles wissenschaftlicher Schrott!“

Die Verfallsdaten der unüberschaubar gewordenen Wissenschaftszweige werden beängstigend kurz. Kein Mensch kann heute wie ein Universalgenie, wie Gottfried Wilhelm Leibniz, das Wissen überblicken. Da hilft die BWG, wenigstens etwas von dem zu erahnen, woran der Kollege der anderen Fakultät zur Zeit arbeitet.

Woran Sie zur Zeit arbeiten, das haben Sie, verehrter Herr *Gilles*, uns heute in gut verständlicher Form mitgeteilt. Herzlichen Dank!

Herzlichen Dank, Herr *Thoma*, für Ihre Laudatio, die uns geholfen hat, die Bedeutung der wissenschaftlichen Leistung Herrn *Gilles* zu begreifen.

Dank an die drei Vortragenden von heute vormittag, die Herren *Krebs* aus Karlsruhe, *Munack* und *Leonhard* aus Braunschweig. Die Themen auf der Einladung lassen ahnen, worum es dabei ging. Solche Vorträge machen sehr viel Arbeit. 1 Minute wissenschaftlicher Vortrag = 1 Arbeitstag Vorbereitung.

In unserer Zeit derart schnellen Wandels braucht man einen Halt. Wir verschaffen uns diesen Halt im Rückblick auf die Vergangenheit, in der Tradition, auch im Ritual. Wir feiern in diesem ehrwürdigen Saal des Altstadttrathauses und nicht in einem der wissenschaftlichen Thematik entsprechenden hochmodernen Saal, wir feiern heute abend im Schloß Richmond. Dazu hat die Stadt Braunschweig beigetragen, indem sie uns wieder für die Gauß-Medaillen-Verleihung die Dornse und das Schloß Richmond zur Verfügung gestellt hat. Herzlichen Dank.

Herzlichen Dank auch den Musikern des Staatstheaters, für den „Mozart“, für alte Musik; auch hier Tradition.

Herzlichen Dank an Sie, unsere lieben Gäste und Freunde der BWG, für Ihr Dabeisein und Interesse. Nochmals Dank an die Stadt Braunschweig, die uns jetzt zum Dämerschoppen in das Bürgermeisterzimmer einlädt.

Das waren die Schlußworte.

Justus Herrenberger

## **MITTEILUNGEN**

### **Veröffentlichungen**

Im Berichtsjahr wurden veröffentlicht:

„Jahrbuch 1991 der BWG“, 261 Seiten.

„Helmarshausen und das Evangeliar Heinrichs des Löwen“ mit 291 Seiten und 273 Abbildungen als Band 4 der Schriften der Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunstgeschichte.

### **Geschäftliche Mitteilungen**

Das Plenum wählte am 15. 05. 1992 in Hannover Prof. em. Dr. Dr. h. c. Ulrich Wagnat, Wolfenbüttel, zum Generalsekretär für die Jahre 1992–1994. Es nahm am 12. 12. 1992 in seiner jährlichen Hauptversammlung die Jahresberichte des Präsidenten und des Generalsekretärs entgegen, beschloß den Haushaltsentwurf für 1994 und erteilte dem Verwaltungsausschuß Entlastung für das Haushaltsjahr 1992. Es bestimmte den Preisträger für die Carl-Friedrich-Gauß-Medaille 1993, die im Rahmen der Feierlichen Jahresversammlung am 11. 06. 1993 überreicht wird. In der am 12. 12. 1992 stattgefundenen Wahlsitzung wurde Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. Werner Leonhard, Wolfenbüttel, einstimmig zum Präsidenten für die Jahre 1993–1995 gewählt. Außerdem fand die Zuwahl von drei ordentlichen und zwei korrespondierenden Mitgliedern statt (vgl. Personalien). Ende 1992 zählte die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft 118 ordentliche und 67 korrespondierende Mitglieder.

### **Satzung und Geschäftsordnungen**

Die Satzung und die Geschäftsordnung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft sowie die Druckschriftenordnung sind im Jahrbuch 1986, Seite 257 ff., veröffentlicht.

## P E R S O N A L I A

### Todesfälle

Es verstarben im Berichtsjahr:

- 14.05.1992 *Rudolf Schmitz*, Marburg, Dr. phil., Prof. für Geschichte der Pharmazie, korr. Mitglied in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften seit 1979.
  
- 19.05.1992 *Alfred Führböter*, Braunschweig, Dr.-Ing., Prof. für Hydromechanik und Küstenwasserbau, o. Mitglied in der Klasse für Bauwissenschaft seit 1989.
  
- 09.06.1992 *Theodor Rummel*, Grünwald, Dr.-Ing., Prof. em. für Elektrowärme der Universität Hannover, o. Mitglied in der Klasse für Ingenieurwissenschaften seit 1969.
  
- 01.09.1992 *Karl-Hermann Körner*, Braunschweig, Dr. phil., Prof. für Romanistik, o. Mitglied in der Klasse für Geisteswissenschaften seit 1990.
  
- 17.09.1992 *Martin Gosebruch*, Braunschweig, Dr. phil. Dr. phil. h.c., Prof. em. für Kunstgeschichte, o. Mitglied in der Klasse für Geisteswissenschaften seit 1971.
  
- 30.11.1992 *Gotthold Pahlitzsch*, Braunschweig, Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h., Prof. em. für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, o. Mitglied in der Klasse für Ingenieurwissenschaften seit 1944.
  
- 31.12.1992 *Hans Herloff Inhoffen*, Konstanz, Dr. phil. Dr. med. h.c., Prof. em. für Organische Chemie der TU Braunschweig, o. Mitglied in der Klasse für Naturwissenschaften seit 1946.



## Nachrufe

### FRIEDRICH ERDMANN-JESNITZER

\* 03.05.1910

† 08.07.1990

Am 8. Juli 1990 verstarb der ordentliche Professor em. Dr.-Ing. habil. Dr. ir. h.c. Friedrich Erdmann-Jesnitzer. Erdmann-Jesnitzer war bis zu seiner Emeritierung Direktor des Instituts für Werkstoffkunde der Universität Hannover und in Personalunion Direktor der Amtlichen Materialprüfanstalt für Werkstoffe des Maschinenwesens und Kunststoffe in Hannover.

Erdmann-Jesnitzer wurde am 3. Mai 1910 in München geboren. Er studierte allgemeinen Maschinenbau an der TH Berlin bis 1937 und wurde bereits 1939 zum Dr.-Ing. am Institut für Metallkunde derselben Hochschule promoviert. 1941 habilitierte sich Erdmann-Jesnitzer und erlangte die *venia legendi* für „Metallkundliche Werkstoffmechanik“. Es folgten eine Hochschuldozentur und 1948 der Ruf an die ordentliche Professor für Metallkunde und Materialprüfung an die Bergakademie Freiberg in Sachsen. Erdmann-Jesnitzer war Direktor des gleichnamigen Instituts dieser Hochschule. 1961 nahm Erdmann-Jesnitzer einen Ruf als ordentlicher Professor für Werkstoffkunde an die Technische Hochschule Hannover an. Er gründete das Institut für Werkstoffkunde (B) und wurde zum Direktor der Amtlichen Materialprüfanstalt für Werkstoffe des Maschinenwesens und Kunststoffe in Hannover berufen. Erdmann-Jesnitzer hat durch rückhaltlosen persönlichen Einsatz das Institut für Werkstoffkunde und die Materialprüfanstalt im Laufe von zwei Jahrzehnten zu internationalem Rang geführt.

Sein wissenschaftliches Werk umfaßt 300 Veröffentlichungen. Mehr als 50 Doktoranden konnte er zur Promotion führen. Sein Werk ist durch Kreativität und wissenschaftliche Exaktheit geprägt. Seine Arbeiten verbinden innovatives Können und Wissen um das praktisch Notwendige mit technisch physikalischer Begründung durch theoretische Modelle. Sein Lebensweg ist durch hohes wissenschaftliches Können, stetes Engagement und klare Zielstrebigkeit geprägt. So war er gerade auch für die jüngeren Wissenschaftler der Fakultät Beispiel und Ansporn.

In der akademischen Selbstverwaltung übernahm er die Leitung der Abteilung für Maschinenbau und setzte sich als Dekan der Fakultät für Maschinenwesen für die übergeordneten Belange des Ingenieurwesens in der Universität ein. Erdmann-Jesnitzer engagierte sich über den Rahmen seiner Hochschule hinaus im In- und Ausland. In Gastprofessuren und Vorträgen vermittelte er sein Wissen anderen Wissenschaftlern und Forschungsinstituten. Sein hohes Wissen, seine klare Diktion und seine besondere Begabung für die Lehre sind zu rühmen. Er war Mitglied des Forschungsbeirats des Instituts für Schweißtechnik in Ljubljana/Jugoslawien, Mitglied des Gesprächskreises „Wissenschaft und Wirtschaft“ des Bundesverbandes der Deutschen Industrie, Mitarbeiter in der UNESCO für Ingenieurausbildung und ordentliches Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft. Er vertrat als Kommissionsmitglied der deutschen Delegation die Schweißtechnik im International Institute of Welding.

Sein Können und seine integre Persönlichkeit ließen ihn im Laufe seines Lebens hohe Ehren erfahren. Darunter waren 1968 die Ehrenpromotion zum Dr. ir. h.c. der Reichsuniversität Gent/Belgien, 1980 die Honorarprofessur der Technischen Universität Harbin/China und die Ehrenmitgliedschaft der Schweißtechnischen Wissenschaftlichen Gesellschaft in Japan.

Erdmann-Jesnitzer hatte wegen seines hohen Könnens und seiner integren Persönlichkeit viele Freunde in der Wissenschaft. Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft verlor in ihm eines ihrer herausragenden Mitglieder.

Hans-Kurt Tönshoff, Hannover

**MARTIN GOSEBRUCH**

\* 20.06.1919

† 17.09.1992

(Vorgetragen in der Plenarversammlung am 13. November 1992)

Am 17. September dieses Jahres verstarb kurz nach Vollendung seines 73. Lebensjahres unser ordentliches Mitglied in der Klasse für Geisteswissenschaften Prof. (em.) Dr. phil. Dr. phil. h.c. Martin Gosebruch. Mit ihm hat die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft eines ihrer profiliertesten Mitglieder, einen im In- wie im Ausland weithin bekannten und anerkannten Gelehrten verloren.

Martin Gosebruch wurde am 20. Juni 1919 in Essen geboren. Er wurde in eine der Kunst verpflichtete Familie hineingeboren: seine Mutter hatte Kunstgeschichte unter Wölfflin studiert, der Bruder sich als Schauspieler und Schriftsteller betätigt, und der Vater, Dr. Ernst Gosebruch, war als Kunstwissenschaftler Direktor des Folkwang-Museums in Essen, das er auf der vorgegebenen Basis von Impressionisten des 19. Jahrhunderts durch den Erwerb und die Darbietung von damals modernen Künstlern wie Nolde, Barlach, Beckmann, Klee und anderen fortzuentwickeln bemüht war. Den neuen Machthabern nach 1933 mißfiel indessen diese moderne Kunst, die ihnen als entartet galt, und nach dem Führungswechsel in der Politik erzwangen sie die Entlassung Dr. Gosebruchs.

Die Familie verzog daraufhin nach Berlin, wo Martin Gosebruch – nachdem er in Essen ein humanistisches Gymnasium besucht hatte – auf dem Bismarck-Gymnasium seine Schulzeit 1937 mit dem Abitur abschloß. Als Jahrgang 1919 gehörte er zu der unglücklichen Generation, die nach der Beendigung der Schule sogleich zum Arbeitsdienst und anschließend zur Wehrmacht eingezogen wurde, um 1939 sodann in den Krieg zu ziehen. Martin Gosebruch kam zur bespannten Artillerie und nahm an den Feldzügen in Frankreich, Rußland und Afrika teil, wo er – nun als Leutnant der Reserve – mit den Resten des deutschen Afrika-Corps als Kriegsgefangener nach Kanada überstellt wurde. Erst 1947 kehrte er aus der Gefangenschaft nach Deutschland zurück.

Während seiner Dienstzeiten hatte er im Rahmen eines Studienurlaubs bereits ein Semester Jura und Kunstgeschichte studiert und im kanadischen Gefangenenlager ergänzende Kenntnisse erwerben können. Zurück in der Heimat, nahm er sein Studium alsbald wieder auf, nunmehr in den Fachgebieten Kunstgeschichte und Archäologie an der Münchener Universität.

1950 schloß er dort sein Studium mit der Promotion zum Dr. phil. auf der Basis einer Dissertation über „Die Bildmacht der burgundischen Skulptur im frühen 12. Jahrhundert“ ab. Zuvor hatte er 1948 die Ehe mit Ina-Marie Körner geschlossen, aus der ein Sohn und zwei Töchter hervorgingen. In ihr wurde die Kunstgeschichte als Familien-tradition fortgeführt. Schon die Ehefrau hatte Kunstgeschichte studiert, wie später dann auch die Tochter Esther, und der Sohn Thomas ist heute als Maler in London tätig.

Nach einer Tätigkeit als Assistent an der Hamburger Kunsthalle erhielt Martin Gosebruch ein zweijähriges Stipendium für die Biblioteca Herziana in Rom. An der Universität Freiburg hat er sich dann 1958 mit einer Schrift über „Florentinische Kapitele von Brunelleschi und den Eigenstil der Frührenaissance“ habilitiert. Als Privatdozent hat er dort seine Tätigkeit als Hochschullehrer begonnen, bis er 1965 auf den Lehrstuhl für Kunstgeschichte an der Technischen Universität Carolo Wilhelmina in Braunschweig berufen wurde.

Als Ordinarius für Kunstgeschichte verzichtete Gosebruch darauf, seine Lehrveranstaltungen auf einige wenige Spezialgebiete, Schulen oder Künstler zu beschränken. Er bot seinen Schülern vielmehr von Semester zu Semester fortschreitend eine Gesamtchau der Kunstgeschichte, was damals außergewöhnlich war und wozu ihn allein sein breites Wissen auf vielen Teilgebieten befähigte. Seine Studierenden gewannen so ein umfassendes Bild des Kunstschaffens von der Antike bis zur Neuzeit. Dabei erzog er sie vor allem zur Genauigkeit der Kunstbetrachtung und zur Wertung der Kunstwerke nach ihrer Qualität und nach ihrem Wahrheitsgehalt. Im Hinblick auf solchen Wissensfundus wurde manchen seiner Schülerinnen und Schüler nach Beendigung des Studiums eine ansehnliche Fachtätigkeit angeboten.

Bei den zahlreichen und ziemlich weit verstreuten Publikationen Gosebruchs zu sehr unterschiedlichen Themen lassen sich allenfalls einige Schwerpunkte seiner Forschungen herausstellen. In erster Linie seine Arbeiten über Giotto, denen er in Assisi und Padua nachspürte; des weiteren sind Michelangelo, Brunelleschi, Donatello und Alberti zu nennen, deren Schöpfungen er eingehender behandelt hat.

Die Berufung Gosebruchs nach Braunschweig brachte ihn mit der Kunst des mittelalterlichen Herzogtums Sachsen in engere Berührung. Zwar hatte er sich schon länger zuvor mit der karolingischen Kunst befaßt, nun aber fand er sich in einer Umgebung, in der sakrale und profane Kunstwerke des frühen und hohen Mittelalters in großer Zahl vorhanden und die von der Kunstgeschichte bisher weniger intensiv behandelt worden waren, während den süddeutschen, französischen und italienischen Werken des Mittelalters stets mehr Beachtung geschenkt worden war. Als bald wurden Untersuchungen an entsprechenden Werken architektonischer, plastischer, malerischer und kunstgewerblicher Natur durchgeführt, und es gelang Gosebruch eine engere Verbindung zwischen Südwestdeutschland und sächsischen Werkstätten nachzuweisen, was er in einer Schrift „Vom oberrheinisch-sächsischen Weg der Kathedralgotik nach Deutschland“ darlegte, woran sich später die Verbindung oberitalienischer Werkstätten mit der Ausgestaltung der Stiftskirche von Königsutter als neue Erkenntnis anschloß.

Am 10. November 1971 wurde Gosebruch zum ordentlichen Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft in der Klasse für Geisteswissenschaften gewählt. Hier konnte er im Plenum wie auch in der genannten Klasse neue Aktivitäten entfalten. In Erinnerung sind seine Vorträge im Plenum der Gesellschaft über das „Kunstreich Bischof Bernwards von Hildesheim“ sowie über „Roger und Heriman, zwei große im Konvent von Helmarshausen wirkende Künstler des Mittelalters“.

In seiner Klasse, deren Vorsitz er von 1979 bis 1987 inne hatte, hielt er nicht weniger als 12 Vorträge: über die Ausbreitung der Kathedralgotik, den Jagdfries von Königs-

lutter, Michelangelos Jüngstes Gericht, die Kunstlehre und Theologie Dantes, Luther und Michelangelo, das Evangeliar Heinrichs des Löwen, Probleme der Bernwardforschung, Kants „Ding an sich“ und die schönen Künste, Goethes Grundsymbol „Vom bunten Bogen“ und Max Beckmanns Faust-Illustrationen, das Krönungsbild im Evangeliar Heinrichs des Löwen und schließlich die Datierung des Utrecht-Psalters. Seine Darbietungen, an denen fallweise auch Mitglieder anderer Klassen teilnahmen, lösten stets lebhaft Diskussionen aus und trugen so erheblich zum geistigen Leben der Gesellschaft bei.

Angesichts so bedeutender Aktivitäten Gosebruchs und seiner Klasse stellte sich die Frage, ob die Gesellschaft nicht eine Erweiterung dieses Aktionsbereichs vornehmen sollte. Nach eingehenden Besprechungen im Verwaltungsausschuß der Gesellschaft und nach dem Beispiel der Akademien der Wissenschaften gliederte sich die Gesellschaft eine „Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunstgeschichte“ an, deren Vorsitz Gosebruch übertragen wurde und den er praktisch bis zu seinem Tode inne hatte. Mit dieser Kommission konnte er ein letztes Lebenswerk verwirklichen.

Seine umfassenden Kenntnisse über die Schulen und Persönlichkeiten der Bau- und Kunstgeschichte ermöglichten es ihm, ein sehr potentes Gremium in- und ausländischer Wissenschaftler der verschiedenen bau- und kunstgeschichtlichen Spezialdisziplinen zu gewinnen, das relativ schnell zu einer echten Forschungsgemeinschaft zusammenwuchs. Ab 1983 wurden auf dieser personellen Basis mittlerweile 6 Symposien zu den Themen „Der Braunschweiger Burglöwe“, „Bernwardinische Kunst“, „Der Magdeburger Dom“, „Helmarshausen und das Evangeliar Heinrichs des Löwen“, „Goslar: Bergstadt – Kaiserstadt“ und schließlich „Halberstadt“ durchgeführt, von denen die Berichte der vier erstgenannten bereits veröffentlicht worden sind und die beiden letzteren sich in redaktioneller Vorbereitung befinden. Ein wahrhaft krönender Abschluß eines ernsten Forscherlebens, in dessen Rahmen Akribie und Verantwortungsbewußtsein hervorrangen. Alle seine Werke zeugen von der Schärfe seines unbestechlichen Blickes, der die betrachteten und beurteilten Kunstwerke aller Art nach Maß, Form, Sinngehalt und Qualität einordnete, als deren höchste Stufe er die Wahrhaftigkeit eines Kunstwerks erkannte. Seine geistigen Bezugspunkte fand er unter anderem bei Dante, Goethe und Kant, und aus seiner Beschäftigung mit der Antike empfing er neben der „edlen Einfalt und stillen Größe“ der griechischen Klassik auch ein tieferes Verständnis für die römische Staatskunst, die der „Alten Welt“ mit der „Pax Augusta“ eine längere Zeit des Friedens zu zivilisatorischer und kultureller Entwicklung schenkte.

Martin Gosebruch war zweifellos ein verständnisbereiter Kollege in den Formen einer heute schon fast vergessenen Zeit. Aber er war auch ein streitbarer Kollege, der seiner Meinung nach fehlerhafte Urteile und Äußerungen nicht unbeantwortet ließ. Den gegen seine Person gerichteten Anfeindungen im Rahmen der 68er Studentenrevolte begegnete er mannhaft und kompromißlos.

Die Liste seiner Veröffentlichungen beinhaltet zahlreiche Abdrucke seiner Repliken in wissenschaftlichen Auseinandersetzungen. Er war ein gefürchteter Diskussionsredner, dessen Beiträge neben der Schärfe seiner Bemerkungen immer auch durch literarische Diktion glänzten. Und dabei handelte es sich keineswegs nur um kunst-

wissenschaftliche Auseinandersetzungen, sondern oft auch um Fragen aus ihm eigentlich fern stehenden Fachgebieten oder solchen allgemeiner Natur, an deren Teilnahme ihn sein breites Wissen befähigte. Er scheute sich auch nicht, ungerechtfertigt bedrängten Künstlern beizustehen, wie beispielsweise dem Maler Wolfgang Klähn, den er mehrfach öffentlich verteidigt hat.

So rundet sich das Bild Martin Gosebruchs neben dem eines erfolgreichen Hochschullehrers und Forschers zu dem eines echten Menschen im besten und weitesten Sinne des Begriffs als ein um Erkenntnis ringendes, seine Irrungen und Träume überwindendes Kind dieser Welt, in tiefem Glauben an eine alles bestimmende göttliche Macht.

Martin Gosebruch hat viel Anerkennung erfahren. Unmittelbar nach seinem Tode wurde seiner in vier großen überregionalen Zeitungen ehrend gedacht, und eindrucksvoller noch war die große Anzahl seiner Freunde, Kollegen und Schüler, die ihn auf seinem letzten Wege begleiteten.

Martin Gosebruch hat durch seine Persönlichkeit und sein Wirken wesentlich zum Ansehen unserer Gesellschaft bei den verschiedensten wissenschaftlichen Institutionen beigetragen. Er wird in unserer Erinnerung wie in den Annalen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft in Ehren fortleben.

Karl-Heinrich Olsen, Braunschweig

## Zuwahlen

Zu ordentlichen Mitgliedern wurden am 12. 12. 1992 gewählt

in die Klasse für Naturwissenschaften

**Harborth, Heiko**, Dr. rer. nat., Prof. für Mathematik an der TU Braunschweig, Bienroder Weg 47, 3300 Braunschweig

1938, 11. 02. geboren in Celle

1958 Abitur an der Niedersächsischen Heimschule in Wolfenbüttel

1964 Staatsexamen für das Höhere Lehramt an der TH Braunschweig

1965 Dr. rer. nat., Promotion in Mathematik an der TH Braunschweig

1972 Habilitation für Mathematik an der TU Braunschweig

1975 apl. Prof. an der TU Braunschweig

1978 Univ.-Prof. (C3) für Mathematik an der TU Braunschweig

**Publikationen:** Über 90 Veröffentlichungen in mathematischen Zeitschriften mit Forschungsergebnissen aus Zahlentheorie, Kombinatorik, Graphentheorie und kombinatorischer Geometrie.

**Herausgabe:** Festschrift für Richard Dedekind als Band XXXIII der Abhandlungen der BWG (wissenschaftliche Redaktion).  
„Mathematische Semesterberichte“ (Mitherausgabe).

**Mitgliedschaft in Fachverbänden und -vereinen:**

Deutscher Verein zur Förderung des Mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts (1963), The Mathematical Association of America (1968), Deutsche Mathematiker-Vereinigung (1968), American Mathematical Society (1974), London Mathematical Society (1977), The Mathematical Association [England] (1978), Österreichische Mathematische Gesellschaft (1980), The Combinatorial Mathematics Society of Australasia (1980), The Fibonacci Association (1988), The Institute of Combinatorics and its Applications [Winnipeg] (1990), Malaysian Mathematical Society (1991), Society for Industrial and Applied Mathematics (1992).

**Mitgliedschaft in wissenschaftlichen Gesellschaften und Akademien:**

The New York Academy of Sciences (1979)

Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft (1992)

**Rieger, Georg Johann**, Dr. rer. nat. o. Prof. für Mathematik an der Universität Hannover, Dorfstraße 33, 3161 Steinwedel

1931, 16. 08. geboren in Bad Kreuznach

1949 Abitur am Gymnasium Günzburg/Donau

1953 Dr. rer. nat., Promotion an der Universität Gießen

1956 Habilitation für Reine Mathematik an der Universität Gießen

1957 Assist. Prof., University of Maryland, College Park, Md. (USA)

1960 Assoc. Prof., Purdue University, Lafayette, Indiana (USA)

1963 apl. Prof., Universität München

1967 Full Prof., State University of New York, Buffalo, N. Y. (USA)  
 1969 Universität München  
 1973 o. Prof. an der Universität Hannover

**Stipendienaufenthalte:**

DAAD-Stipendiat Universität Wien (1954/55),  
 Stipendiat National Science Found USA am Inst. for Adv. Study in Princeton,  
 N.J. [USA] (1961).

**Gastprofessuren:** Univ. Bordeaux (1977), Univ. Campinas [Brasilien] (1978), A & M Univ.  
 College Station Texas [USA] (1981), Univ. Witwatersrand Johannesburg  
 [Südafrika] (1985).

**Publikationen:** Über 100 wissenschaftliche Veröffentlichungen in Fachzeitschriften.  
 Buch: „Zahlentheorie“. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1978.

**in die Klasse für Bauwissenschaften**

**Zielke, Werner, Dr.-Ing. Dipl.-Ing., o. Prof. für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen**  
 im Bauwesen an der Universität Hannover, Lönsweg 31, 3008 Garbsen 5

1937, 08. 12. geboren in Swinemünde

1957 Abitur am Märkischen Gymnasium in Iserlohn

1959 Vordiplom an der RWTH Aachen

1962 Dipl.-Ing. an der TH München

1966 Promotion an der University of Michigan, Ann Arbor (USA)

1976 o. Prof. für Strömungsmechanik an der TU Hannover

1963–1964 Wiss. Assistent am Institut für Wasserbau der TH München

1964–1967 Research Assistant an der University of Michigan, Ann Arbor (USA)

1967–1970 Research Engineer bei der Boeing Company, Seattle, Wash. (USA)

1970–76 Wiss. Angestellter der TU München an der Versuchsanstalt für Wasserbau  
 in Oberrach

**Publikationen:** Über 90 Aufsätze in wissenschaftlichen Fachzeitschriften  
 Buch: „Elektronische Berechnung von Rohr- und Gerinneströmungen“  
 Erich Schmidt Verlag 1974

**Mitgliedschaften in Beratungskommissionen:**

Senatskommission und Bewilligungsausschuß der DFG für Sonderforschungsbereiche

Kuratorium des Zentrums für Flachmeer-, Küsten- und Meeresumweltforschung (TERRAMARE)

**Mitgliedschaft in Fachverbänden und -vereinen:**

American Society of Civil Engineers

International Association for Hydraulic Research

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau

International Geophysical Union



Zu korrespondierenden Mitgliedern wurden am 12.12.1991 gewählt:

in die Klasse für Naturwissenschaften und Mathematik

**Wittig**, Hermann, Dr. rer. nat. habil. Dr. rer. nat. h.c., Professor für Mathematik an der Universität Freiburg/Brsg., Anemonenweg 3, 7800 Freiburg

in die Klasse für Geisteswissenschaften

**Ullmann**, Ernst, Dr. phil. habil., Professor für Kunstgeschichte an der Universität Leipzig, Tschai-kowskistraße 31, O-7010 Leipzig

## Inhaber der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille

- 1949 *Walter Reppe* †, Dr. phil., Dr. phil. nat. h. c., Dr.-Ing. E. h., Honorarprofessor der Universität Mainz und Technischen Hochschule Darmstadt.
- 1950 *Arvid Hedvall* †, fil. dr., Dr. phil. h. c., Dr.-Ing. h. c., Dr. Techn. h. c., em. o. Professor für Silikatchemie der Technischen Hochschule Göteborg/Schweden.
- 1951 *Wilhelm Nusselt* †, Dr.-Ing. E. h., em. o. Professor für Theoretische Maschinenlehre an der Technischen Hochschule München.
- 1952 *Erwin W. Müller*, Dr.-Ing. habil., Dr. rer. nat. h. c., Dr. h. c., Evan-Pugh Res. Professor an der Pennsylvania State University, University Park, Penn./USA.
- 1953 *Gustav Wolf* †, Dr.-Ing. E. h., Professor in Münster.
- 1954 *Max Strutt*, Dr. techn., Dr.-Ing. E. h., o. Professor für Höhere Elektrotechnik an an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich/Schweiz.
- 1955 *Fritz Arndt* †, Dr. phil., Dr. rer. nat. h. c., Dr. h. c., em. o. Professor für Organische Chemie an der Universität Breslau, Honorarprofessor an der Universität Hamburg.
- 1955 *Pascual Jordan* †, Dr. phil., em. o. Professor für Theoretische Physik an der Universität Hamburg.
- 1956 *Ulrich Finsterwalder*, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h., München.
- 1957 *Georg Sachs* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h., o. Professor für Metallurgie an der Syracuse University, Syracuse, N. Y./USA.
- 1958 *Werner Schmeidler* †, Dr. phil., Dr.-Ing. E. h., em. o. Professor für Mathematik an der Technischen Universität Berlin.
- 1959 *Hans Brockmann*, Dr. sc. nat. habil., Dr. rer. nat. e. h., em. o. Professor für Organische Chemie an der Universität Göttingen.
- 1960 *Theodor von Kármán* †, Dr. phil., Dr.-Ing. E. h., Dr. rer. nat. h. c., mult., LL. D., Professor am California Institute of Technology, Pasadena, Calif./USA.
- 1961 *Kurt Paul Klöppel* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h., o. Professor für Statik und Stahlbau an der Technischen Hochschule Darmstadt.
- 1962 *Walter Schottky* †, Dr. phil., Dr.-Ing. E. h., Dr. rer. nat. h. c., Dr. techn. E. h., em. o. Professor für Theoretische Physik an der Universität Erlangen.
- 1963 *Gottfried Köthe*, Dr. phil., Dr. h. c., Dr. rer. nat. h. c. mult., em. o. Professor für Angewandte Mathematik an der Universität Heidelberg.
- 1964 *Carl Wagner* †, Dr. phil., Dr. rer. nat. h. c., Dr.-Ing. E. h., Professor und vormalig Direktor des Max-Planck-Instituts für Physikalische Chemie in Göttingen.

- 1965 *Albert Betz* †, Dr. phil., Dr.-Ing. E. h., Dr. sc. techn. h. c., Professor und vormalig Direktor der Aerodynamischen Versuchsanstalt und des Max-Planck-Instituts für Strömungsforschung in Göttingen.
- 1966 *Wilhelm Becker*, Dr. phil., Dr. h. c., em. o. Professor und Direktor der Astronomisch-Meteorologischen Anstalt der Universität Basel/Schweiz.
- 1967 *Henry Görtler* †, Dr. phil. habil., LL. D. h. c., em. o. Professor der Mathematik und vormalig Direktor des Instituts für Angewandte Mathematik der Universität Freiburg i. Br.
- 1968 *Egon Orowan*, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h., o. Professor für Mechanical Engineering am Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass./USA.
- 1969 *E. Arne Bjerhammer*, tekn. dr., Professor für Geodäsie an der Kungl. Tekniska Högskolan in Stockholm/Schweden.
- 1970 *Elie Carafoli* †, Dr. rer. nat., Professor für Aero-Gas-Dynamik an dem Polytechnischen Institut Bukarest und vormalig Direktor des Institut de Mécanique des Fluides „Traian Vuia“ in Bukarest/Rumänien.
- 1971 *Walter Dieminger*, Dr. rer. techn., apl. Professor für Geophysik an der Universität Göttingen und vormalig Direktor des Max-Planck-Instituts für Aeronomie in Lindau/Harz.
- 1972 *Hubert Rüsç* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h., em. o. Professor für Massivbau an der Technischen Hochschule München und vormalig Direktor des Amtlichen Materialprüfungsamtes für das Bauwesen.
- 1973 *Viktor Gutmann*, Dr. techn., Ph. D., Sc. D., Dr. rer. nat. h. c., Dr. Sc. h. c., o. Professor für Anorganische Chemie an der Technischen Universität Wien/Österreich.
- 1974 *Friedrich Tamms* †, Dr. h. c., Professor, Beigeordneter der Stadt Düsseldorf (Stadtbaurat i. R.), Freischaffender Planer.
- 1975 *Sir Michael James Lighthill*, FRS, FRAeS, Hon. D. Sc. mult., Professor für Mathematik an der University of Cambridge/Großbritannien.
- 1977 *Walter Maurice Elsasser*, Dr. phil., o. Professor für Geophysik an der Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland/USA.
- 1977 *Helmut Moritz*, Dr. techn., Dr.-Ing. E. h., o. Professor für Geodäsie an der Technischen Universität Graz/Österreich.
- 1977 *László Fejes Tóth*, Dr., Professor und Direktor des Mathematischen Forschungsinstituts der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest/Ungarn.
- 1978 *Ulrich Grigull*, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h., em. o. Professor für Thermodynamik an der Technischen Universität München.
- 1979 *Wolf Freiherr von Engelhardt*, Dr. phil., em. o. Professor für Mineralogie und Petrographie an der Universität Tübingen.

- 1980 *Hans Kuhn*, Dr. phil., Dr. rer. nat. h.c., Professor und vormals Direktor am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen.
- 1981 *Martin Kneser*, Dr. rer. nat., o. Professor für Mathematik an der Universität Göttingen.
- 1982 *Walter Burkert*, Dr. phil., o. Professor für Klassische Philologie an der Universität Zürich/Schweiz.
- 1983 *Leopold Müller* †, Dr. techn., Dr. mont. h.c., Honorarprofessor an der Universität Salzburg (Felsmechanik), Salzburg/Österreich.
- 1984 *Heinz Beneking*, Dr. rer. nat., o. Professor und Direktor des Instituts für Halbleitertechnik der Technischen Universität Aachen.
- 1985 *Gerhard Ertl*, Dr. rer. nat., Professor und Direktor am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin.
- 1986 *Arno Borst*, Dr. phil., o. Professor für Geschichte des Mittelalters an der Universität Konstanz.
- 1987 *Olgierd Cecil Zienkiewicz*, FRS, Ph. D., D. Sc., Hon. D. Sc. mult., Professor of Civil Engineering an der University of Wales, Swansea/Großbritannien.
- 1988 *Heinz Brauer*, Dr.-Ing., Professor für chemische Ingenieurtechnik an der Technischen Universität Berlin.
- 1989 *Herbert Walther*, Professor für Experimentalphysik an der Universität München und Direktor des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik in Garching.
- 1990 *Raymond Klibansky*, Dr. phil. Dr. phil. h.c., Professor der Philosophie (Logik und Metaphysik) an der McGill University in Montreal, Kanada, und Fellow des Wolfson College, Oxford (seit 1981).
- 1991 *Wilfried B. Krätzig*, Dr.-Ing., Professor für Ingenieurmechanik an der Ruhr-Universität Bochum.
- 1992 *Ernst-Dieter Gilles*, Dr.-Ing., Professor für Meß- und Regelungstechnik an der Universität Stuttgart.

## Mitgliederverzeichnis

(Stand 31.12.1992)

### Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft

Fallersleber-Torwall 16, 3300 Braunschweig

Telefon: (0531) 391-4596

*Präsident:* Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Oberbeck  
(bis 31.12.1992)

*Generalsekretär:* Prof. em. Dr. Dr. h.c. Ulrich Wannagat  
(bis 31.12.1994)

*Geschäftsstelle:* Frau Hannelore Haubold (Büroleiterin)  
Frau Gabriele Köppelmann-Dennstedt

### Klasse für Naturwissenschaften und Mathematik

*Vorsitzender:* Prof. em. Dr. rer. nat. Hans-Joachim Kowalsky (bis 31.12.1995)

#### *Ordentliche Mitglieder:*

- Becker, Gerhard (21.12.1916), Dr. rer. nat., Dr.-Ing. h.c., Ltd. Dir. u. Prof. i.R. (Physik, PTB Braunschweig), Dießelhorststraße 32, 3300 Braunschweig
- Bogen, Hans Joachim (19.11.1912), Dr. rer. nat., Prof. em. (Botanik, TU Braunschweig), Am Hohen Tore 4 A, 3300 Braunschweig
- Braß, Helmut (22.2.1936), Dr. rer. nat., Prof. (Angewandte Mathematik, TU Braunschweig), Hilsstraße 26, 3300 Braunschweig
- Cramer, Friedrich (20.9.1923), Dr. rer. nat., Prof. u. Dir. (Organische Chemie, MPI für Experimentelle Medizin, Göttingen), Hermann-Rein-Straße 3F, 3400 Göttingen
- Dieminger, Walter (7.7.1907), Dr. rer. techn., apl. Prof. u. Dir. i.R. (Aeronomie, MPI für Aeronomie, Lindau), Berliner Straße 14, 3412 Nörten-Hardenberg 1
- Ehrich, Hans Dieter (2.2.1943), Dr. rer. nat., Prof. (Inst. f. Programmiersprachen und Informationssysteme), Mannheimstraße 66, 3300 Braunschweig
- Grütmacher, Martin (10.11.1901), Dr. phil. habil., Honorarprof. u. Ltd. Dir. a.D. (Akustik, PTB Braunschweig), Sulzbacher Straße 36, 3300 Braunschweig
- Gundermann, Karl-Dietrich (20.2.1922), Dr. rer. nat., Prof. (Organische Chemie, TU Clausthal), Birckenbachstraße 2, 3392 Clausthal-Zellerfeld
- Harborth, Heiko (11.2.1938), Dr. rer. nat. habil., Prof. (Mathematik, TU Braunschweig), Bienroder Weg 47, 3300 Braunschweig
- Hartmann, Thomas (2.2.1937), Dr. rer. nat., Prof. (Pharmazeutische Biologie, TU Braunschweig), Walter-Hans-Schultze-Straße 21, 3300 Braunschweig
- Haul, Robert (31.5.1912), Dr.-Ing. habil., Prof. em. (Physikalische Chemie, Universität Hannover), Schellingstraße 5, 3000 Hannover 61

- Hövermann, Jürgen (15.3.1922), Dr. rer. nat., Prof. (Geographie, Universität Göttingen), Nelkenstraße 10, 3410 Northeim-Hillerse
- Hopf, Henning (13.12.1940), Dr. phil., Prof. (Organische Chemie, TU Braunschweig), Dürerstraße 8, 3300 Braunschweig
- Kanold, Hans-Joachim (29.7.1914), Dr. rer. nat. habil., Prof. em. (Mathematik, TU Braunschweig), Güldenstraße 41, 3300 Braunschweig
- Kersten, Martin (28.4.1906), Dr.-Ing., Honorarprof. u. Präs. i.R. (Physik, PTB Braunschweig), Am Hohen Tore 4A, 3300 Braunschweig
- Kertz, Walter (29.2.1924), Dr. rer. nat., Dr. E.h., Prof. (Geophysik und Meteorologie, TU Braunschweig), Pestalozzistraße 2, 3300 Braunschweig
- Kowalsky, Hans-Joachim (16.7.1921), Dr. rer. nat., Prof. em. (Mathematik, TU Braunschweig), Am Schiefen Berg 20, 3340 Wolfenbüttel
- Kroepelin, Hans (28.12.1901), Dr. phil., Prof. em. (Chemische Technologie, TU Braunschweig), Hermann-Riegel-Straße 12, 3300 Braunschweig
- Maaß, Günter (7.1.1934), Dr. rer. nat., Prof. (Biophysikalische Chemie, Medizinische Hochschule Hannover), Im Eichholz 27, 3000 Hannover 51
- Müller, Georg (1.10.1930), Dr. rer. nat., Prof. (Mineralogie und Petrographie, TU Clausthal), Einersberger Blick 27, 3392 Clausthal-Zellerfeld
- Müller, Hans Robert (26.10.1911), Dr. phil., Prof. em. (Mathematik, TU Braunschweig), Am Schiefen Berg 49, 3340 Wolfenbüttel
- Pilger, Andreas (19.12.1910), Dr. phil. habil., Prof. em. (Geologie und Paläontologie, TU Clausthal), Berliner Straße 125, 3392 Clausthal-Zellerfeld
- Richter, Egon (24.3.1928), Dr. rer. nat., Prof. (Theoretische Physik, TU Braunschweig), Sommerlust 33, 3300 Braunschweig
- Rieger, Georg Johann (16.8.1931), Dr. rer. nat., Prof. (Mathematik, Universität Hannover), Dorfstraße 33, 3161 Steinwedel
- Röhrs, Manfred (22.9.1927), Dr. rer. nat., Prof. (Zoologie, Tierärztliche Hochschule Hannover), Im Dorffeld 43, 3005 Hemmingen
- Rosenbach, Otto K. (25.9.1914), Dr.-Ing., Prof. em. (Geophysik, TU Clausthal), Am Hohen Tore 4A, 3300 Braunschweig
- Schügerl, Karl (22.6.1927), Dr. rer. nat., Dipl.-Ing., Prof. (Technische Chemie, Universität Hannover), Arnumer Kirchstraße 31, 3005 Hemmingen 4
- Schumann, Hilmar (8.11.1902), Dr. phil. habil., Prof. em. (Mineralogie, TU Braunschweig), Eitelbrodstraße 3a, 3300 Braunschweig
- Schwab, Klaus (20.5.1933), Dr. rer. nat., Prof. (Geologie und Paläontologie, TU Clausthal), Berliner Straße 119, 3392 Clausthal-Zellerfeld
- Schwink, Christoph (20.3.1928), Dr. rer. nat., Prof. (Physik, TU Braunschweig), Spitzwegstraße 21, 3300 Braunschweig
- Stahl, Wolfgang (17.8.1935), Dr. rer. nat., Dir. u. Prof. (Isotopengeochemie und -geophysik, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), Hermann-Löns-Weg 14, 3006 Burgwedel 4
- Steudel, Andreas (17.2.1925), Dr. rer. nat., Prof. (Physik, Universität Hannover), Hahnensteg 41C, 3000 Hannover 91

- Tietz, Horst (11. 3. 1921), Dr. phil., Prof. (Mathematik, Universität Hannover), Rödinger Straße 31, 3008 Garbsen
- Vollmar, Roland (1. 11. 1939), Dr.-Ing., Prof. (Informatik, TU Braunschweig), Wendtstraße 10, 7500 Karlsruhe 21
- Wannagat, Ulrich (31. 5. 1923), Dr. rer. nat., Dr. techn. h.c., Prof. (Anorganische Chemie, TU Braunschweig), Waldweg 12, 3340 Wolfenbüttel
- Weinert, Hanns Joachim (26. 1. 1927), Dr. phil., Dr. rer. nat. habil., Prof. (Mathematik, TU Clausthal), Glückauf-Weg 6, 3392 Clausthal-Zellerfeld
- Welling, Herbert (1. 9. 1929), Dr. rer. nat., Prof. (Physik, Universität Hannover), Nogatweg 13, 3004 Isernhagen
- Willerdig, Ulrich (8. 7. 1932), Dr. rer. nat., apl. Prof. (Botanik, Universität Göttingen), Calsowstraße 60, 3400 Göttingen
- Winterfeldt, Ekkehard (13. 5. 1932), Dr. rer. nat., Prof. (Organische Chemie, Universität Hannover), Sieversdamm 34, 3004 Isernhagen 2
- Zinner, Gerwalt (30. 9. 1924), Dr. phil., Prof. (Pharmazeutische Chemie, TU Braunschweig), Am Papenholz 14, 3300 Braunschweig

*Korrespondierende Mitglieder:*

- Bartels, Heinz, Dr. med., Prof. em. (Vegetative Physiologie, Medizinische Hochschule Hannover), Am Rehberg 7, 7763 Öhningen-Wangen
- Becker, Wilhelm, Dr. phil., Dr. h.c., Prof. em. (Astronomie, Universität Basel), Im Spiegelfeld 12, CH-4102 Binningen ü. Basel/Schweiz
- Bürger, Hans, Dr. rer. nat, Dipl.-Chem., Prof. (Anorganische Chemie, Bergische Universität / Gesamtschule Wuppertal), Kruppstraße 230, 5600 Wuppertal-Elberfeld
- Elsasser, Walter M., Dr. phil., Prof. (Physik), Department of Earth and Planetary Sciences, Johns Hopkins University Baltimore, Maryland 21218/USA
- Engelhardt, Wolf, Freiherr von, Dr. phil., Prof. em. (Mineralogie und Petrographie), Mineralogisch-Petrographisches Institut, Universität Tübingen, Wilhelmstraße 56, 7400 Tübingen 1
- Ertl, Gerhard, Dr. rer. nat., Prof. u. Dir. (Physikalische Chemie, Fritz-Haber-Institut, Max-Planck-Gesellschaft), Garystraße 18, 1000 Berlin 33
- Gutmann, Viktor, Dr. techn., Ph. D., Sc. D., Dr. rer. nat. h.c., Dr. Sc. h.c., Prof. (Chemie), Institut für Anorganische Chemie, TH Wien, Getreidemarkt 9, A-1060 Wien/Österreich
- Haken, Hermann, Dr. rer. nat., Dr. h.c. mult., Prof. (Theoretische Physik, Universität Stuttgart), Sandgrubenstraße 1, 7032 Sindelfingen
- Hengge, Edwin Franz Kurt, Dr. techn., Prof. (Anorganische Chemie, TU Graz), Ziegelstraße 9z, A-8045 Graz/Österreich
- Inhoffen, Hans Herloff, Dr. phil., Dr. med. h.c., Prof. em. (Organische Chemie, TU Braunschweig), Lorettostraße 34a, 7750 Konstanz († 31. 12. 1992)
- Kaluza, Theodor, Dr. rer. nat., Prof. em. (Mathematik, Universität Hannover), Nötelweg 4, 3000 Hannover 91

- Keßler, Franz Rudolf (11.8.1927), Dr. phil., Prof. em. (Physik, TU Braunschweig, Am Krausberg 12, 5160 Düren)
- Kippenhahn, Rudolf, Dr. rer. nat., Prof. u. Dir. (Astrophysik, Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik), Rautenbreite 2, 3400 Göttingen
- Kneser, Martin, Dr. rer. nat., Prof. (Mathematik, Universität Göttingen), Guldenhagen 5, 3400 Göttingen
- Kreutzkamp, Norbert, Dr. phil., Prof. (Pharmazeutische Chemie), Institut für Pharmazeutische Chemie, Universität Hamburg, Laufgraben 28, 2000 Hamburg 13
- Kuhn, Hans, Dr. phil., Prof. u. Dir. i. R. (Biophysikalische Chemie, MPI für biophysikalische Chemie), Ringoldswilstraße 50, CH-3656 Tschingel ob Gunten/Schweiz
- Mensching, Horst, Dr. rer. nat., Prof. em. (Geographie, Universität Hamburg), Heinz-Hilpert-Straße 10, 3400 Göttingen
- Schaller, Friedrich, Dr. rer. nat., Prof. (Zoologie), Zoologisches Institut, Universität Wien, Dr.-Karl-Lueger-Ring 1A, A-1010 Wien/Österreich
- Schmitz, Rudolf, Dr. phil., Prof. (Geschichte und Pharmazie, Universität Marburg), Roter Graben 10, 3550 Marburg († 14.5.1992)
- Scriba, Christoph J., Dr. rer. nat., Prof. (Geschichte der Naturwissenschaften, Universität Hamburg), Bellevue 23, 2000 Hamburg 60
- Tóth, László Fejes, Dr., Prof. (Mathematik), Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences Reáltanoda U.13–15, Budapest V/Ungarn
- Unsöld, Albrecht, Dr. phil., Dr. rer. nat. h.c. mult., Dr. Sc. h.c., Prof. em. (Theoretische Physik und Astronomie, Universität Kiel), Sternwartenweg 17, 2300 Kiel 1
- Voronkov, Michael Gregor, Dr. rer. nat., Dr. h.c., Prof. u. Dir. (Chemie), Siberian Division of the Academy of Sciences of the USSR, Institute of Organic Chemistry, 1 Favorsky Street, 664033 Irkutsk/UdSSR
- Witting, Hermann, Dr. rer. nat. habil., Dr. rer. nat. h.c., Prof. (Mathematik, Universität Freiburg), Anemonenweg 3, 7800 Freiburg

### **Klasse für Ingenieurwissenschaften**

*Vorsitzender:* Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Rudolf Jeschar (bis 31.12.1993)

*Ordentliche Mitglieder:*

- Baehr, Hans Dieter (24.6.1928), Dr.-Ing., Dr. E.h., Prof. (Thermodynamik, Universität Hannover), Max-Eyth-Straße 54, 3000 Hannover 1
- Batel, Wilhelm (3.11.1922), Dr.-Ing., Prof. u. Dir. (Verfahrenstechnik, FAL Braunschweig), Peter-Joseph-Krahe-Straße 8, 3300 Braunschweig
- Blenk, Hermann (9.12.1901), Dr. phil., Prof. em. (Flugmechanik, TU Braunschweig), Margaretenhöhe 32, 3300 Braunschweig
- Bohnet, Matthias (20.7.1933), Dr.-Ing., Prof. (Verfahrens- und Kerntechnik, TU Braunschweig), Otto-Hahn-Straße 45, 3300 Braunschweig
- Bretthauer, Karlheinz (5.3.1922), Dr.-Ing., Prof. (Elektrotechnik, TU Clausthal), Berliner Straße 45, 3392 Clausthal-Zellerfeld
- Dizioğlu, Bekir (13.12.1920), Dr.-Ing., Prof. (Getriebelehre und Maschinendynamik, TU Braunschweig), Marienburgweg 36, 3340 Wolfenbüttel



- Funke, Paul (5.2.1930), Dr.-Ing., Prof. (Werkstoffumformung, TU Clausthal), Schulstraße 15, 3392 Clausthal-Zellerfeld
- Groth, Klaus (8.12.1923), Dr.-Ing., Prof. (Kolbenmaschinen, Universität Hannover), Schaftrift 18, 3003 Ronnenberg 2
- Haeßner, Frank (6.1.1927), Dr. rer. nat., Prof. (Werkstoffkunde und Herstellungsverfahren, TU Braunschweig), Julius-Leber-Straße 46, 3300 Braunschweig
- Hennicke, Hans Walter (22.1.1927), Dr. rer. nat., Prof. (Keramik und Email, TU Clausthal), Am Turmhof 8, 3392 Clausthal-Zellerfeld
- Jeschar, Rudolf (17.6.1930), Dr.-Ing. Dr. h.c., Prof. (Energieverfahrenstechnik, TU Clausthal), Roseneck 1, 3380 Goslar
- Kind, Dieter (5.10.1929), Dr.-Ing., Dr. h.c., Honorarprof. (Hochspannungstechnik, TU Braunschweig) u. Präsident der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Knapfstraße 4, 3300 Braunschweig
- Lautz, Günter (15.11.1923), Dr. rer. nat., Prof. em. (Elektrophysik, TU Braunschweig), Fallsteinweg 97, 3340 Wolfenbüttel
- Leilich, Hans-Otto (28.11.1925), Dr.-Ing., Prof. em. (Datenverarbeitungsanlagen, TU Braunschweig), Am Schiefen Berg 61 a, 3340 Wolfenbüttel
- Leonhard, Werner (25.5.1926), Dr.-Ing., Dr. h.c., Prof. (Regelungstechnik, TU Braunschweig), Am Schiefen Berg 32, 3340 Wolfenbüttel
- Leschonski, Kurt (17.12.1930), Dr.-Ing., Prof. (Mechanische Verfahrenstechnik, TU Clausthal), Am Dammgraben 20, 3392 Clausthal-Zellerfeld
- Mahrenholtz, Oskar (17.5.1931), Dr.-Ing., Prof. (Mechanik, TU Hamburg-Harburg), Hermann Löns-Weg 17 F, 2105 Seevetal 3 – Horst
- Marx, Claus (21.8.1931), Dr.-Ing., Dr. E.h., Prof. (Tiefbohrkunde und Erdölgewinnung, TU Clausthal), Am Kleikamp 15, 3014 Laatzen 5
- Matthies, Hans Jürgen (6.11.1921), Dr.-Ing., Prof. em. Dr. E.h. (Landmaschinen, TU Braunschweig), Wöhlerstraße 15, 3300 Braunschweig
- Mitschke, Manfred (5.5.1929), Dr.-Ing., Prof. (Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig), Buchfinkweg 1, 3300 Braunschweig
- Musmann, Hans Georg (14.8.1935), Dr.-Ing., Prof. (Nachrichtentechnik, Universität Hannover), Heckenrosenweg 24, 3320 Salzgitter-Bad
- Pahlitzsch, Gotthold (19.4.1903), Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. em. (Werkzeugmaschinen u. Fertigungstechnik, TU Braunschweig), Hermann-Riegel-Straße 15, 3300 Braunschweig († 30.11.1992)
- Rögener, Heinz (20.9.1913), Dr. phil., Prof. em. (Thermodynamik, Universität Hannover), Asselweg 10B, 3008 Garbsen
- Ruge, Jürgen (14.5.1921), Dr.-Ing., Dr. h.c. mult., Prof. (Schweißtechnik und Werkstofftechnologie, TU Braunschweig), Waldstraße 16, 8034 Germering
- Rummel, Theodor (30.5.1910), Dr.-Ing. habil., Prof. em. (Elektrowärme, Universität Hannover), Leerbichl-Allee 20, 8022 Grünwald († 9.6.1992)
- Schönfelder, Helmut (3.4.1926), Dr.-Ing., Prof. (Nachrichtentechnik, TU Braunschweig), Liegnitzer Straße 22, 3340 Wolfenbüttel

- Schwerdtfeger, Klaus (16. 9. 1934), Dr.-Ing., Prof. (Allgemeine Metallurgie, TU Clausthal), Zeppelinstraße 28, 3380 Goslar
- Thoma, Manfred (24. 2. 1929), Dr.-Ing., Dr. h.c. mult., Prof. (Regelungstechnik, Universität Hannover), Westermannweg 7, 3000 Hannover 21
- Tönshoff, Hans Kurt (14. 5. 1934), Dr.-Ing., Prof. (Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen, Universität Hannover), Bruchholziesen 10, 3006 Burgwedel 1
- Unger, Hans-Georg (14. 9. 1926), Dr.-Ing., Dr. h.c. mult., Prof. (Hochfrequenztechnik, TU Braunschweig), Wöhlerstraße 10, 3300 Braunschweig
- Weh, Herbert (1. 3. 1928), Dr.-Ing. Dr. h.c., Prof. (Starkstromtechnik, TU Braunschweig), Wöhlerstraße 20, 3300 Braunschweig
- von Zabeltitz, Christian (7. 8. 1932), Dr.-Ing., Prof. (Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover), Hellwiesen 3, 3002 Wedemark 9 (Meitze)

*Korrespondierende Mitglieder:*

- Beneking, Heinz, Dr. rer. nat., Prof. (Halbleitertechnik, TH Aachen), Valkenburger Straße 17, 5100 Aachen
- Bosnjaković, Fran, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Dr. h.c., Prof. em. (Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt, Universität Stuttgart), Umgelterweg 17D, 7000 Stuttgart 1
- Gersten, Klaus, Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h., Prof. (Thermo- und Fluidodynamik, Universität Bochum), Hofleite 15, 4630 Bochum
- Grigull, Ulrich, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. em. (Thermodynamik, TU München), Heinrich-Vogl-Straße 1, 8000 München 71
- Mayinger, Franz, Dr.-Ing., Prof. (Verfahrenstechnik, TU München), Am Haselnußstrauch 18, 8000 München 45
- Schlitt, Herbert, Dr. phil. nat., Prof. (Regelungstechnik), Institut für Regelungstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Egerlandstraße 5, 8520 Erlangen
- Strutt, M.J.O., Dr. techn., Dr.-Ing. E.h., Prof. (Höhere Elektrotechnik, ETH Zürich), Krähbühlstraße 59, CH-8044 Zürich/Schweiz
- Truckenbrodt, Erich, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. em. (Strömungsmechanik, TU München), Joseph-Wirth-Straße 12, 8022 Grünwald

**Klasse für Bauwissenschaften**

*Vorsitzender:* Prof. Dr.-Ing. Justus Herrenberger (bis 31.12.1994)

*Ordentliche Mitglieder:*

- Billib, Herbert (21.10.1904), Dr.-Ing., Dr. nat. techn. h.c., Prof. em. (Wasserwirtschaft, Hydrologie, Landwirtschaftlicher Wasserbau, Universität Hannover), Franzenbaderhof 9, 3000 Hannover 71
- Buchwald, Konrad (16. 2. 1914), Dr. phil. nat. habil., Prof. em. (Landespflege, Universität Hannover), Große Heide 33, 3000 Hannover 51

- Duddeck, Heinz (14. 5. 1928), Dr.-Ing., Dr. h.c., Prof. (Statik, TU Braunschweig), Greifswaldstraße 38, 3300 Braunschweig
- Esslinger, Maria (4. 3. 1913), Dr.-Ing., apl. Prof. (Statik, DFVLR Braunschweig), Busardweg 2, 3300 Braunschweig
- Führböter, Alfred (26. 3. 1931), Dr.-Ing., Prof. (Hydromechanik und Küstenwasserbau, TU Braunschweig), Joseph-Frauenhofer-Straße 35, 3300 Braunschweig († 19. 5. 1992)
- Gerke, Karl (10. 8. 1904), Dr.-Ing., Prof. em. (Geodäsie, TU Braunschweig), Spitzwegstraße 19, 3300 Braunschweig
- Hake, Günter (27. 5. 1922), Dr.-Ing., Dr. phil. h.c., Prof. (Topographie und Kartographie, Universität Hannover), Börie 58, 3005 Hemmingen 1
- Henn, Walter (20. 12. 1912), Dr.-Ing., Dr. techn. h.c., Prof. em. (Baukonstruktionen und Industriebau, TU Braunschweig), Petritorwall 20, 3300 Braunschweig
- Herrenberger, Justus (27. 5. 1920), Dr.-Ing., Prof. em. (Baukonstruktion, TU Braunschweig), Ginsterweg 22, 3300 Braunschweig
- Hoeltje, Georg (16. 3. 1906), Dr. phil., Prof. em. (Bau- und Kunstgeschichte, Universität Hannover), Alte Herrenhäuser Straße 11c, 3000 Hannover 21
- Höpcke, Walter (19. 8. 1908), Dr.-Ing., Prof. em. (Allgemeine Vermessungskunde, Universität Hannover), Kühnsstraße 82, App. 228, 3000 Hannover 71
- Konecny, Gottfried (17. 6. 1930), Dr.-Ing., Prof. (Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover), Wartheweg 22, 3000 Hannover 73
- Kordina, Karl (7. 8. 1919), Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. em. (Stahlbeton- und Massivbau, TU Braunschweig), Im Heidekamp 13, 3300 Braunschweig
- Mecke, Wilhelm (12. 8. 1907), Dr.-Ing., Prof. em. (Straßenwesen und Erdbau, TU Braunschweig), Pascheburging 8, 3410 Northeim 1
- Möller, Dietrich (18. 12. 1927), Dr.-Ing., Prof. (Vermessungskunde, TU Braunschweig), Steinkamp 6, 3306 Lehre 1
- Natke, Hans Günther (9. 5. 1933), Dr. rer. nat., Prof. (Schall- und Meßtechnik, Universität Hannover), Pyrmonter Straße 51, 3000 Hannover 91
- Partensky, Hans-Werner (3. 4. 1926), Dr.-Ing., Dr. phys., Prof. (Verkehrswasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover), Wiehbergstraße 20, 3000 Hannover 81
- Pelzer, Hans (20. 1. 1936), Dr.-Ing., Prof. (Vermessungskunde, Universität Hannover), Waldstraße 40, 3050 Wunstorf 2
- Pierick, Klaus (19. 2. 1928), Dr.-Ing., Prof. (Verkehr, Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung, TU Braunschweig), Am Uhlenbusch 31, 3300 Braunschweig
- Renard, Walter (12. 5. 1904), Dipl.-Ing., Prof. em. (Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover), Bevenser Weg 10, 3000 Hannover 61
- Rostásy, Ferdinand Stefan (4. 5. 1932), Dr.-Ing., Prof. (Baustoffe und Stahlbetonbau, TU Braunschweig), Nietzschestraße 26, 3300 Braunschweig
- Rothert, Heinrich (5. 12. 1938), Dr.-Ing., Prof. (Statik, Universität Hannover), Feldbrunnenstraße 15, 2000 Hamburg 13

- Scheer, Joachim (5.3.1927), Dr.-Ing., Prof. (Stahlbau, TU Braunschweig), Wartheweg 20, 3000 Hannover 71
- Stein, Erwin (5.7.1931), Dr.-Ing., Prof. (Baumechanik, Universität Hannover), Am Ortfelde 124, 3004 Isernhagen 2 (NB)
- Weimann, Günter (6.6.1921), Dr.-Ing., Prof. em. (Photogrammetrie und Kartographie, TU Braunschweig), Knupfertal 40, 7920 Heidenheim 5
- Wierig, Hans-Joachim (22.6.1927), Dr.-Ing., Prof. (Baustoffkunde, Universität Hannover), Hindenburgallee 31, 3007 Gehrden
- Wortmann, Wilhelm (15.3.1897), Dipl.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. em. (Stadt- und Regionalplanung, Universität Hannover), Morgensternweg 10, 3000 Hannover 21
- Zielke, Werner (8.7.1937), Dr.-Ing., Prof. (Strömungsmechanik, Universität Hannover), Lönsweg 31, 3008 Garbsen 5

*Korrespondierende Mitglieder:*

- Bjerhammer, Arne, tekn. dr., Prof. (Geodäsie), Institutionen för Geodesi, Kungl. Tekniska Högskolan, S-10044, Stockholm 70 / Schweden
- Garbrecht, Günther, Dr.-Ing., Dr. sc. h.c., Prof. (Wasserbau, Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, TU Braunschweig), Drosselweg 15, 3301 Lagesbüttel
- Habekost, Heinrich, Dipl.-Ing., Prof. em. (Städtebau, Straßenbau, Tiefbau, TU Braunschweig), Drusenbergstraße 95, 4630 Bochum
- Hofmann, Wilhelm, Dr.-Ing., Prof. em. (Baukonstruktion und Entwerfen, Universität Hannover), Mayr-Graz-Weg 22, 8110 Murnau
- Kistenmacher, Hans, Dr. rer. pol., Prof. (Regional- und Landesplanung, Universität Kaiserslautern), Friedrich-Ebert-Straße 1, 6719 Neuleiningen
- Kracke, Rolf, Dr.-Ing., Prof. (Verkehrs- und Eisenbahnwesen, Universität Hannover), Buchenweg 4, 3003 Ronnenberg 3, OT Benthe
- Krätzig, Wilfried B., Dr.-Ing., Prof. (Statik und Dynamik/Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum), Wagenfeldstraße 8a, 5810 Witten 3
- Moritz, Helmut, Dr. techn., Dr.-Ing. E.h., Prof. (Erdmessung und physikalische Geodäsie, TU Graz), Maria-Troster-Straße 114, A-8043 Graz/Österreich
- Pieper, Klaus, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. em. (Statik, TU Braunschweig), Ginsterweg 13, 3300 Braunschweig
- Spengelin, Friedrich (29.3.1925), Dipl.-Ing., Prof. (Städtebau, Universität Hannover), Habichtshorststraße 12, 3000 Hannover
- Stracke, Ferdinand (27.5.1935), Dipl.-Ing., Prof. (Städtebau und Regionalplanung, Technische Universität München), Karlstraße 43/II, 8000 München 2
- Torge, Wolfgang, Dr.-Ing., Prof. (Theoretische Geodäsie, Universität Hannover), Mönchekamp 4A, 3000 Hannover 91
- Triebel, Wolfgang, Dr.-Ing., Honorarprof. (Bauforschung, Universität Hannover), Max-Eyth-Straße 48, 3000 Hannover

Wolf, Helmut, Dr.-Ing., Dr. sc. techn. h.c., Dr. phil. h.c., Dr. h.c., Prof. em. (Geodäsie, Universität Bonn), Am Sonnenhang 10, 5300 Bonn-Ippendorf  
 Zerna, Wolfgang, Dr.-Ing., Prof. em. (Konstruktiver Ingenieurbau, Universität Bochum), Am Wittenstein, 4320 Hattingen

### **Klasse für Geisteswissenschaften**

*Vorsitzender:* Prof. Dr. med. Dr. phil. habil. Claus-Artur Scheier (bis 31.12.1993)

#### *Ordentliche Mitglieder:*

Boeder, Heribert (17.11.1928), Dr. phil., Prof. (Kultur- und Geowissenschaften, Universität Osnabrück), Heinrichstraße 37, 4500 Osnabrück  
 Ehlers, Joachim (31.5.1936), Dr. phil., Prof. (Mittelalterliche Geschichte, TU Braunschweig), Sprottaustraße 1, 3300 Braunschweig  
 Gosebruch, Martin (20.6.1919), Dr. phil., Dr. phil. h.c., Prof. em. (Kunstgeschichte, TU Braunschweig), Gieselerwall 4, 3300 Braunschweig († 17.9.1992)  
 Henne, Helmut (5.4.1936), Dr. phil., Prof. (Germanistische Linguistik, TU Braunschweig), Platanenstraße 27, 3340 Wolfenbüttel  
 Kamp, Norbert (24.8.1927), Dr. phil., Prof. (Mittelalterliche Geschichte, TU Braunschweig), Leipziger Straße 236B, 3300 Braunschweig  
 Killy, Walther (26.8.1917), Dr. phil., Prof. (Deutsche Literaturwissenschaften, Herzog August Bibliothek Wolfenbüttel), Calsowstraße 17, 3400 Göttingen  
 König, Joseph (24.9.1915), Dr. phil., Archivdirektor a.D. (Geschichte), Paracelsusstraße 24, 3340 Wolfenbüttel  
 Körner, Karl-Hermann (8.3.1941), Dr. phil., Prof. (Romanisches Seminar, TU Braunschweig), An der Paulikirche 1, 3300 Braunschweig († 1.9.1992)  
 Lohse, Eduard (19.2.1924), Dr. theol. D., Honorarprof. u. Landesbischof (Ev.-luth. Landeskirche Hannover), Ernst-Curtius-Weg 7, 3400 Göttingen  
 Maurach, Gregor (3.3.1932), Dr. phil., Prof. (Lateinische Philologie, TU Braunschweig), Anton-Aulke-Straße 27, 4400 Münster  
 Meckseper, Cord (29.10.1934), Dr.-Ing. habil., Prof. (Bau- u. Kunstgeschichte, Universität Hannover), Eisenacher Weg 4, 3000 Hannover 1  
 Mohr, Hans-Heinrich (1.6.1917), Dr. rer. pol. (Versicherungswissenschaften), Am Bürgerpark 4a, 3300 Braunschweig  
 Müller, Gerhard (10.5.1929), Dr. theol., D.D., Honorarprof. u. Landesbischof (Ev.-luth. Landeskirche Braunschweig), Salzdahlumer Straße 43, 3340 Wolfenbüttel  
 Nitz, Hans-Jürgen (20.8.1929), Dr. phil., Prof. (Kulturgeographie, Universität Göttingen), Kramberg 21, 3406 Bovenden  
 Oberbeck, Gerhard (5.10.1925), Dr. rer. nat., Prof. (Geographie und Wirtschaftsgeographie, Universität Hamburg), Ginsterweg 4, 2087 Ellerbek  
 Olsen, Karl Heinrich (20.12.1908), Dr. rer. techn. habil., apl. Prof. entpfl., Ltd. Dir. i. R. (Agrarpolitik, Landwirtschaftliche Betriebslehre, Wirtschaftsgeographie), Saarstraße 5, 3300 Braunschweig

- Raabe, Paul (21.2.1927), Dr. phil. habil., Dr. h.c. mult., apl. Prof. und Direktor (Herzog-August-Bibliothek), Roseggerweg 45, 3340 Wolfenbüttel
- Rosen, Edgar R. (18.6.1911), Dr. phil., Prof. em. (Politikwissenschaft, TU Braunschweig), Jasperallee 7, 3300 Braunschweig
- Scheier, Claus-Artur (8.9.1942), Dr. phil. habil., Dr. med., Prof. (Geschäftsführender Leiter des Philosophischen Seminars A der TU Braunschweig), Brahmsstraße 1, 3300 Braunschweig
- Schillemeit, Jost (18.2.1931), Dr. phil., Prof. (Deutsche Literaturwissenschaft, TU Braunschweig), Friedensallee 48, 3300 Braunschweig
- Schindel, Ulrich (10.10.1935), Dr. phil. habil., Prof. (Direktor des klass.-phil. Seminars der Univ. Göttingen), Albert-Schweitzer-Straße 3, 3400 Göttingen
- Thieme, Werner (13.10.1923), Dr. jur., Prof. (Verwaltungslehre, Universität Hamburg), Am Karpfenteich 58, 2000 Hamburg 63
- Thies, Harmen (26.12.1941), Dipl.-Ing., Dr. phil., Prof. (Baugeschichte, TU Braunschweig), Adolfstraße 55, 3300 Braunschweig
- Wilhelm, Herbert (8.6.1922), Dr. oec., Prof. (Volkswirtschaftslehre, TU Braunschweig), Hirschbergstraße 16, 3300 Braunschweig

*Korrespondierende Mitglieder:*

- Beumann, Helmut, Dr. phil. habil., Dr. phil. E.H., Prof. em. (Mittelalterliche Geschichte, Universität Marburg), Am Glaskopf 7, 3550 Marburg/Lahn
- Borst, Arno, Dr. phil., Prof. (Geschichte des Mittelalters, Universität Konstanz), Längerbohlstraße 42, 7750 Konstanz
- Burkert, Walter, Dr. phil., Prof. (Klassische Philologie, Universität Zürich), Wildsbergstraße 8, CH-8610 Uster/Zürich (Schweiz)
- Dörig, José, Dr. phil., Prof. (Archäologie, Universität Genf), 12, chemin des Manons, CH-1218 Grand Saconnex, Genf/Schweiz
- Elbern, Victor H., Dr. phil., Honorarprof., (Kunstgeschichte, Freie Universität Berlin), Ilsensteinweg 42, 1000 Berlin 38
- Fehl, Philipp P., Ph. D., Dr. phil., Prof. em. (Kunstgeschichte), School of Art and Design, 408 East Peabody Drive, University of Illinois, USA-Champaign, Illinois 61820
- Garrigues, Marie-Odile, Dr. phil., Prof. (Philosophie und Theologie), Via San Damaso 49, I-00165 Rom/Italien
- Goetting, Hans, Dr. phil., Prof. (Historische Hilfswissenschaften, Universität Göttingen), Waitzweg 7, 3400 Göttingen
- Hubala, Erich, Dr. phil., Prof. em. (Kunstgeschichte, Universität Würzburg), Liebigstraße 15, 8000 München 22
- Klibansky, Raymond, Dr. phil., Prof. (Department of Philosophy), Wolfson College, Oxford University, GB-Oxford OX 2 6 UD
- Neumann, Günter, Dr. phil., Prof. em., Thüringer Straße 20, 8700 Würzburg
- Narkiss, Bezalel, Dr. phil., Prof. (Department of Art History u. Dir. des Index of Jewish Art, Hebrew University Jerusalem), The Hebrew University, Jerusalem/Israel

- Lavrov, Sergée, Dr., Prof. (Ökonomische Geographie, Universität Leningrad), Universität Leningrad, Leningrad/UdSSR
- Oexle, Otto Gerhard (28. 8. 1939), Dr. phil., Prof. u. Dir. (Geschichte, MPI für Geschichte, Göttingen), Planckstraße 15, 3400 Göttingen
- Peroni, Adriano, Dr. phil., Prof. (Kunstgeschichte, Universität Florenz), Via Lungo L'Affrico 164, I-50137 Firenze/Italien
- Rambaldi, Enrico, Dr. phil., Prof. (Philosophie, Universität Mailand), Via Monte Bianco 36, I-20149 Milano/Italien
- Raupach, Hans, Dr. jur. habil., Prof. em. (Soziologie, Universität München), Groffstraße 20, 8000 München 19
- Rosen, Stanley, Dr. phil., Prof. (Philosophie), Pennsylvania State University, 1256 South Garner Street, State College, Pennsylvania 16801/USA
- Tsujimura, Koichi, Dr. phil., Prof. (Philosophie, Universität Kyoto), Sakyoku, Kamitakano, Higashida-cho 12, J-606 Kyoto/Japan
- Ullmann, Ernst, Dr. phil. habil., Prof. (Kunstgeschichte, Universität Leipzig), Tschai-kowskistraße 31, O-7010 Leipzig
- Voppel, Götz, Dr. rer. pol., Prof. (Wirtschafts- und Sozialgeographie, Universität Köln), Neckarstraße 58, 5000 Köln 90
- Zeitler, Rudolf, Dr. phil., Prof. em. (Kunstgeschichte, Universität Uppsala), Regngatan 16, S-75431 Uppsala/Schweden